

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do potencial Eólico – validação de uma metodologia espacial multi-estação

Pedro Tomás Lopes Domingues Carreira Pedrosa

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:

Professora Doutora Ana Isabel Lopes Estanqueiro (FCUL)
Doutora Teresa Maria Veloso Nunes Simões Esteves (LNEG)

Resumo

A preocupação com as mudanças climáticas está cada vez mais presente na nossa sociedade, pelo que redução do uso de combustíveis fósseis tem conduzido a maioria dos países à utilização cada vez maior de energias de fonte renovável. Neste contexto, a energia eólica assume um papel da maior relevância tendo-se verificado a instalação massiva destes sistemas num elevado número de países. No entanto, em países como Portugal, onde a orografia é bastante complexa, a avaliação do recurso eólico pode, nalguns casos ser um desafio, devido à formação de vórtices turbulentos em zonas de grande declive e à variabilidade espacial do vento. Atualmente, esta temática é ainda recorrente, sendo necessário nalguns locais com estas características, recorrer a vários pontos de medição para uma melhor representação do comportamento do vento nas áreas onde se pretende desenvolver projetos. Assim, neste trabalho, é apresentada uma metodologia para a avaliação do potencial eólico em áreas de dimensão média a elevada em terrenos de orografia complexa. O método proposto, recorre a dados estatísticos do potencial eólico provenientes de n estações anemométricas criando um compósito espacial multi-estação. Esta metodologia, desenvolvida pelo LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), tem sido utilizada nos últimos 10 anos. No entanto, devido ao avanço da tecnologia eólica e dos sistemas de medição do vento, torna-se atualmente necessário efetuar uma revalidação desta metodologia com um conjunto mais alargado de dados experimentais. Neste sentido, esta dissertação tem como objetivo a validação deste método, bem como o desenvolvimento de uma ferramenta de trabalho para auxiliar a implementação do método e que no futuro possa ser disponibilizada ao público para aplicação da metodologia desenvolvida a outros locais. Através da análise de dados provenientes de várias estações são sugeridas boas práticas para a aplicação do método proposto, tendo como base a aplicação de diferentes métodos de cálculo da distância - distância Euclidiana, Chebychev, Manhattan e Minkowsky. Para o desenvolvimento dos trabalhos recorreu-se a um modelo padrão para o mapeamento do recurso eólico (WASP) e a um modelo não linear de base CFD (WindSim). Os resultados obtidos permitiram perceber que para aplicação do método compósito desenvolvido o tipo de distância tem um impacto pouco significativo na estimativa da velocidade do vento, e que, os fatores mais importantes para a aplicação do método são, a qualidade dos dados do vento e o método de obtenção dos mapeamentos do recurso energético do vento. Foi ainda realizada uma comparação entre os resultados dos dois modelos, tendo-se concluído que ambos apresentam bons resultados muito embora, tal como esperado, o modelo não linear tem melhor desempenho e verificou-se que os resultados são melhores quando se recorre a dados de vento provenientes de estações que se encontram no topo de montanhas.

Palavras-Chave: método compósito multi-estação, potencial eólico, geo-estatística, *WASP*, *WindSim*, métodos estatísticos de interpolação

Abstract

As the concern of climatic changes is constantly growing in our society, reducing the use of fossil fuel has led most countries to increasingly utilize renewable energy resources instead. In this context, wind energy has taken a major role and wind energy systems have been installed in several countries. However, in countries such as Portugal where the orography is highly complex, wind resource assessment can be challenging due to the turbulent vortex formation in high slope areas and the spatial wind variability. In places with aforementioned characteristics, it is necessary to use several measurement points to accurately represent wind behaviour in the areas where projects are to be developed. This work presents a methodology for the evaluation of wind potential in the medium to high areas in complex orography. The proposed method uses statistical data of wind potential from n anemometric stations creating a multi-station spatial composite. This methodology, developed by LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), has been used for the last 10 years. However, due to the advancement of wind technology and wind measurement systems, it is now necessary to revalidate this approach with a broader set of experimental data. This dissertation aims to validate this method, and additionally develop of a tool to assist the implementation of the method and which in the future may be made available to the public. Through the analysis of data from several anemometric stations, good practices are suggested for the application of the proposed method, based on the comparative study of different distance calculation methods - Euclidean, Chebychev, Manhattan, and Minkowsky distance. For the development of the works, we used a standard model for wind resource mapping (WASP) and a nonlinear CFD base model (WindSim). The results obtained show that the application of the multi-station method with different types of distances has a minor impact on the wind speed estimation and that the most important factors for the application of the method are the quality of the wind data and the method of obtaining wind energy resource mappings. A comparison was also made between the results of the two models, and it was concluded that both show good results however, as expected, the nonlinear model has better results especially in cases when the wind data is coming from stations located on top of mountainous areas which is when it performs best.

Keywords: Spatial multi-station composite, wind potencial, geo-statistics, *WASP*, interpolation statistic method

Índice

Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tabelas	vii
Índice de Equações	viii
Índice de Anexos.....	ix
Simbologia e notações	xi
Agradecimentos	xiii
1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização da dissertação	2
2. Estado da arte para a caracterização do recurso eólico	4
2.1. Metodologias para avaliação do recurso eólico	4
2.1.1. Modelo linear – <i>WAsP</i>	4
2.1.2. Modelo não linear - <i>WindSim</i>	5
2.2. Mapeamento de potencial eólico com base em múltiplas fontes de dados	6
2.3. Terrenos complexos	7
2.3.1. Indicador de complexidade de terreno – <i>RIX</i>	8
3. Aspectos Teóricos do Vento	10
3.1. Avaliação do potencial eólico	10
3.1.1. Brisas de montanha e de vale	10
3.1.2. Distribuição da velocidade do vento	10
3.1.3. Gradiente do vento	12
3.1.4. Potência.....	13
3.2. Métricas de Avaliação de Erro.....	14
3.2.1. Viés	14
3.2.2. Erro absoluto médio (<i>MAE</i>)	14
3.2.3. Erro quadrático médio (<i>MSE</i>)	14
3.2.4. Raiz do erro quadrático médio (<i>RMSE</i>)	14
3.2.5. Erro absoluto médio normalizado (<i>MAPE</i>).....	15
3.2.6. Regressão Linear Simples.....	15
4. Metodologia Aplicada	17
4.1. Ferramenta desenvolvida	18
4.2. Parâmetros de estudo de terreno complexo.....	19
4.3. Metodologia de comparação de mapas de recurso.....	20
4.4. Distâncias analisadas	23

4.4.1.	Distância Euclidiana	23
4.4.2.	Distância Manhattan	23
4.4.3.	Distância Minkowsky	23
4.4.4.	Distância Chebyshev	23
4.5.	Comparação das diferentes distâncias e número de estações anemométricas a utilizar na criação do compósito	24
4.6.	Parâmetro RIX	24
5.	Resultados da Aplicação da metodologia desenvolvida.....	27
5.1.	Caso de estudo 1 - Serra do Perdigão	27
5.1.1.	Tratamento de dados	27
5.1.2.	Análise de dados	29
5.1.3.	Processo de obtenção das grelhas de vento multi-compósito	36
5.1.3.1.	Processo I.....	37
5.1.3.2.	Processo II.....	37
5.1.3.3.	Processo III	39
5.1.4.	Método de compósito.....	39
5.1.5.	Comparação de diferentes distâncias para o método multi-compósito	42
5.1.6.	Comparação de modelo linear com modelo CFD	44
5.1.6.1.	Modelo Linear - <i>WAsP</i>	44
5.1.6.2.	Modelo não linear – <i>WindSim</i>	49
5.2.	Caso de estudo 2 - Serra da Freita.....	55
5.2.1.	Tratamento de dados da Serra da Freita – Caso de estudo 2.....	55
5.2.2.	Análise de dados	56
5.3.	Implementação do indicador RIX na ferramenta WRG Calculator	61
5.3.1.	Avaliação RIX na ferramenta desenvolvida	61
5.3.2.	Avaliação do RIX no programa <i>WAsP</i>	62
5.3.3.	Comparação de índices RIX	63
5.4.	Síntese dos resultados obtidos.....	65
6.	Conclusões	72
	Bibliografia	74
	Anexos	78
A.	Tabelas de análise de erro individual para caso de estudo 2.....	79
B.	Tabelas de análise de erro individual para estudo de comparação entre compósitos.....	80
C.	Mapas de recurso, tabelas de análise de erro individuais e regressões lineares para estudo de comparação de distâncias e compósitos	81
D.	Diagrama de Rosa dos Ventos e Função Densidade.....	96

Índice de Figuras

Figura 1.1 - (a) Capacidade acumulada, nova capacidade instalada e sob construção, fonte: [2]; (b) Capacidade do vento instalada acumulada no mundo, fonte: [3].....	1
Figura 2.1 - (a) Locais da experiências do projeto NEWA; (b) dupla cumeada no Perdigão, orografia do terreno e disposição das estações a vermelho. Fonte: [8]	7
Figura 2.2 - Traçado do erro da previsão do WAsP e o indicador de avaliação orográfico. Os círculos preenchidos correspondem a pares monte-monte os círculos vazios a pares planície-monte; Fonte: [37]	8
Figura 3.1 - Função de densidade de Weibull para a variação do parâmetro λ o valor de k é igual a 2, e para a variação do parâmetro k o valor de λ é igual a 6 m/s.	11
Figura 3.2 - Histograma e curva ajustada de Weibull. Fonte: [45]	11
Figura 3.3 - Diagrama rosa-dos-ventos gerado pelo WAsP; a) diagrama à esquerda e FDP de Weibull à direita; b) sector 11 selecionado à esq. e a FDP de Weibull para o sector 11 à dir.	12
Figura 3.4. - <i>Regressão linear simples à origem. Fonte: [52]</i>	16
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia multi-compósito para obtenção de grelhas de recurso dos compósitos.	18
Figura 4.2 - Interface da ferramenta desenvolvida "WRG Calculator 0.1".	19
Figura 4.3. - Exemplo de mapeamento do recurso eólico pela ferramenta desenvolvida.	20
Figura 4.4. – Exemplo de uma regressão linear simples à origem.	22
Figura 4.5 - Exemplo de $s \times ss$ direções para $s=12$ e $ss=1$	25
Figura 4.6. - Esquema do cálculo do declive.	25
Figura 4.7. – A vermelho encontram-se os declives superiores a θ_c para a mesma área de estudo. Visualização em a) três dimensões ou em b) duas dimensões.	26
Figura 5.1. - Mapa topográfico da área de estudo do Perdigão (legenda no canto inferior direito). Estações coloridas por classes de acordo com a altura das estações anemométricas (legenda no canto superior direito). As estações anemométricas utilizadas na metodologia aplicada estão realçadas com um retângulo azul. Fonte: LNEG.....	28
Figura 5.2 - Mapeamento do Perdigão a) mapa isolinhas; b) mapa de rugosidade.....	28
Figura 5.3 – Gráfico de dispersão do viés ao longo de D para as estações anemométricas da serra do Perdigão.	30
Figura 5.4. – Gráfico de dispersão do viés com Δz para as estações anemométricas da serra do Perdigão.	31
Figura 5.5. – Gráfico de dispersão do viés obtido para cada estimativa efetuada para cada altitude com barra de cor correspondente à diferença de altitude para o caso de estudo da serra do Perdigão. Linha azul envolvente do dataset corresponde ao convexo de hull.....	32
Figura 5.6. – Diagrama de caixa do viés por estação anemométrica para o caso de estudo da serra do Perdigão.	32
Figura 5.7. – Diagrama de barras da amplitude para cada estação anemométrica para o caso de estudo da serra do Perdigão.....	33
Figura 5.8. – Gráfico de dispersão do viés com a diferença de velocidades, Δv , e barra de cor com a diferença de altitude, Δz para o caso de estudo da serra do Perdigão.	34
Figura 5.9. - Perfil diário serra do Perdigão para anemómetro a 20 m de altura.	35
Figura 5.10 – Gráfico de dispersão do indicador de desempenho ΔRIX com o viés para as estações anemométricas da Serra do Perdigão.	36
Figura 5.11 – Dados estatísticos da estação anemométrica rne02. a) Rosa-dos-ventos; b) diagrama de Weibull.....	37
Figura 5.12 - Propriedades do módulo "Terrain" do Windsim inseridas para simulação do terreno....	37
Figura 5.13 – Representação do modelo digital do terreno da sua a) elevação e da sua b) rugosidade	38
Figura 5.14. - Mapeamento do compósito a) WAsPMultiComp; b) WindSimMultiComp; c) WindSimComp. Em c) a escala do WindSim está entre ~ 1 e $\sim 5,5$ m/s onde cada cor representa uma diferença de 0,5 m/s.	40

Figura 5.15. - Estudo da regressão linear da velocidade estimada pela velocidade observada com o compósito: a) WAsPMultiComp; b) WindSimMultiComp; c) WindSimComp.	41
Figura 5.16 – Mapeamento do recurso eólico da Serra do Perdigão obtido através das grelhas de recurso do WAsP: a) rne02; b) rne07; c) rsw03; d) rsw06; e) rsw07; f) tnw01; g) tnw07; h) tnw10; i) tse06; j) tse08; l) tse11	46
Figura 5.17 - Regressão linear à origem da velocidade observada com a velocidade estimada para cada estação com o mapa de recurso obtido através do WAsP: a) rne02; b) rne07; c) rsw03; d) rsw06; e) rsw07; f) tnw01; g) tnw07; h) tnw10; i) tse06; j) tse08;	48
Figura 5.18 – Mapeamento do recurso eólico da Serra do Perdigão obtido através das grelhas de recurso do WindSim: a) rne02; b) rne07; c) rsw03; d) rsw06; e) rsw07; f) tnw01; g) tnw07; h) tnw10; i) tse06; j) tse08; l) tse11	51
Figura 5.19 – Regressão linear à origem da velocidade observada com a velocidade estimada para cada estação com o mapa de recurso obtido através do WindSim: a) rne02; b) rne07; c) rsw03; d) rsw06; e) rsw07; f) tnw01; g) tnw07; h) tnw10; i) tse06; j) tse08;	54
Figura 5.20 - Mapeamento da zona da Serra da Freita; a) mapa topográfico; b) mapa de rugosidade. Fonte: Map editor do WAsP	56
Figura 5.21. – Gráfico de dispersão do viés ao longo de D para a serra da Freita	57
Figura 5.22. – Gráfico de dispersão do viés com Δz para a para as estações anemométricas da serra da Freita.	58
Figura 5.23. – Gráfico de dispersão do viés obtido para cada estimativa efetuada para cada altitude com barra de cor correspondente à diferença de altitude para o caso de estudo da serra da Freita. No zoom com os três pontos o intervalo entre as linhas horizontais a tracejado correspondem a 0.05 m/s.....	58
Figura 5.24. – a) Diagrama de caixa do viés por estação anemométrica para o caso de estudo da serra de Freita; b) Diagrama de barras da amplitude para cada estação anemométrica para o caso de estudo da serra do Perdigão.....	59
Figura 5.25. – Gráfico de dispersão do viés com a diferença de velocidades, Δv , e barra de cor com a diferença de altitude, Δz para o caso de estudo da serra do Perdigão.	60
Figura 5.26. – Perfil diário serra da Freita com anemómetro a 40 m de altura.....	60
Figura 5.27 - Gráfico de dispersão do indicador de desempenho ΔRIX com o viés para as estações anemométricas da Serra de Freitas.....	61
Figura 5.28. – Representação do RIX para as quatro estações anemométricas efetuada pela ferramenta desenvolvida a) Estação A, RIX = 13.92%, b) Estação B, RIX = 18.70%, c) Estação C, RIX = 21.80% e d) Estação D, RIX = 18.40%.....	62
Figura 5.29. - Representação do RIX para as quatro estações anemométricas efetuada pelo WAsP a) Estação A, RIX = 13.73%, b) Estação B, RIX = 18.69%, c) Estação C, RIX = 23.7 % e d) Estação D, RIX = 20.68%	63

Índice de Tabelas

Tabela 4.1. - Exemplo de tabela de análise de erro individual de um mapa de recurso obtido.	21
Tabela 4.2. - Exemplo de tabela de análise de erro de um mapa de recurso gerado a partir de um compósito.....	21
Tabela 4.3. - Exemplo de tabela de parâmetros do modelo linear da comparação dos valores estimados por um mapa de recurso e os valores observados.	22
Tabela 5.1 - Dados e identificação das estações anemométricas na serra do Perdigão	27
Tabela 5.2 - Disponibilidade da série temporal de dados.	27
Tabela 5.3 – Tabela de análise de erro individual para a estação tse11.....	29
Tabela 5.4 – Análise de Viés de todas as estações em estudo da serra do Perdigão. Cada entrada apresenta um tom de vermelho, azul ou branco, dependendo do valor do viés: 0 m/s <viés ≤ 2 m/s - cor vermelha; -2 m/s ≤ viés < 0 m/s - cor azul; viés ≈ 0 m/s cor mais clara ou branca.	29
Tabela 5.5 - Valores de RIX para cada estação anemométrica da Serra do Perdigão.....	35
Tabela 5.6 - Valores de ΔRIX entre todas as estações anemométricas da Serra do Perdigão.	36

Tabela 5.7 - Propriedades do módulo "Wind Fields" do Windsim inseridas para simulação numérica das equações de Navier-Stokes. Fonte: Relatório de simulação WindSim.....	38
Tabela 5.8 - Tempo de simulação, número de iterações e o estado de convergência por sector (C: convergência). Fonte: Relatório de simulação do WindSim.....	39
Tabela 5.9. - Comparação de resultados dos compósitos criados.	40
Tabela 5.10. – Parâmetros da regressão linear dos vários compósitos.	41
Tabela 5.11. – Estações utilizadas para cada compósito.....	42
Tabela 5.12. – Erros médios dos mapas de recurso gerados pela WRG Calculator presentes no Anexo D com WRG's obtidos através do programa WAsP para todas as distâncias discutidas no capítulo 3.2.	42
Tabela 5.13 - Parâmetros do modelo de regressão linear para avaliação das figuras presentes no Anexo D com WRG's obtidos através do programa WAsP para todas as distâncias discutidas no capítulo 3.2.	43
Tabela 5.14. - Erros médios dos mapas de recurso gerados pelo WAsP de cada estação anemométrica.	46
Tabela 5.15. - Parâmetros do modelo de regressão linear para avaliação dos mapas de recurso obtidos pelo WAsP.	49
Tabela 5.16. - Erros médios dos mapas de recurso gerados pelo WindSim de cada estação anemométrica.....	52
Tabela 5.17. – Parâmetros do modelo de regressão linear para avaliação dos mapas de recurso obtidos pelo WindSim.	55
Tabela 5.18 - Dados e identificação das estações anemométricas na Serra da Freita.....	55
Tabela 5.19 - Dados estatísticos da velocidade média, fluxo de potência e parâmetros de Weibull A e k.	56
Tabela 5.20. – Análise de Viés de todas as estações em estudo da serra da Freita. Cada entrada apresenta um tom de vermelho, azul ou branco, dependendo do valor do viés: $0 \text{ m/s} < \text{viés} \leq 2 \text{ m/s}$ - cor vermelha; $-2 \text{ m/s} \leq \text{viés} < 0 \text{ m/s}$ - cor azul; $\text{viés} \approx 0 \text{ m/s}$ cor mais clara ou branca.	57
Tabela 5.21 – Valores de RIX para cada estação anemométrica da Serra de Freitas.....	60
Tabela 5.22 – Valores de ΔRIX entre todas as estações anemométricas da Serra de Freitas.	60
Tabela 5.23. – Avaliação RIX por sector efetuada pela ferramenta desenvolvida.....	62
Tabela 5.24. – Avaliação RIX por sector efetuada pelo programa WAsP.....	63
Tabela 5.25. - Resultados da comparação por setor e total do RIX obtido pela ferramenta desenvolvida e WAsP map editor.	64
Tabela 5.26 - Tabelas de análise de erro individual para estação rne02.....	66
Tabela 5.27 - Tabela de análise de erro individual para a estação rne07.....	66
Tabela 5.28 – Tabela de análise de erro individual para a estação rsw03.....	67
Tabela 5.29. – Tabela de análise de erro individual para a estação rsw06.....	67
Tabela 5.30. – Tabela de análise de erro individual para a estação rsw07.....	67
Tabela 5.31. – Tabela de análise de erro individual para a estação tnw01.	68
Tabela 5.32. – Tabela de análise de erro individual para a estação tnw07.	68
Tabela 5.33 – Tabela de análise de erro individual para a estação tnw10.	68
Tabela 5.34. – Tabela de análise de erro individual para a estação tse06.....	69
Tabela 5.35 – Tabela de análise de erro individual para a estação tse08.....	69
Tabela 5.36. – Tabela de análise de erro individual para a estação tse11.....	69

Índice de Equações

Equação 2.1 - Cálculo do ângulo crítico.....	8
Equação 3.1 - Função de Densidade de Probabilidade de Weibull.....	10
Equação 3.2 - Parâmetro de escala c.....	10
Equação 3.3 - Função gama (Γ).....	11
Equação 3.4 - Função de Potência.....	13
Equação 3.5 - Gradiente do vento vertical com função logarítmica.....	13

Equação 3.6 - Cálculo do shear factor	13
Equação 3.7 - Energia cinética do vento.....	13
Equação 3.8 - Potência disponível do vento [49].....	13
Equação 3.9 - Fluxo de potência.....	13
Equação 3.10 – Limite de Betz: rendimento máximo teórico do aproveitamento do vento por uma turbina.	13
Equação 3.11 - Potência extraída pela turbina	14
Equação 3.12 - Cálculo do erro.....	14
Equação 3.13 - Cálculo do erro absoluto médio.	14
Equação 3.14 - Cálculo do erro quadrático médio.....	14
Equação 3.15 - Cálculo da raiz do erro quadrático médio.	15
Equação 3.16 - Cálculo do erro normalizado médio.....	15
Equação 3.17 - Modelo de regressão linear simples	15
Equação 3.18 - Cálculo de r^2	15
Equação 4.1. – Cálculo da distância absoluta	19
Equação 4.2. – Cálculo da diferença de altitude entre estações anemométricas.....	19
Equação 4.3. – Cálculo do ΔRIX	20
Equação 4.4. – Cálculo da diferença de velocidades observadas	20
Equação 4.5 - Distância Euclidiana a n dimensões.....	23
Equação 4.6 - Distância Manhattan para n dimensões.....	23
Equação 4.7 - Distância Minkowsky para n dimensões.....	23
Equação 4.8 - Distância de Chebyshev	23
Equação 4.9. – Sistema de equação condicional em função do declive.....	25
Equação 4.10. - Cálculo do indicador de complexidade de terreno RIX.	25
Equação 5.1. – Cálculo da amplitude do diagrama de caixa.....	33
Equação 5.2. - Cálculo do desvio entre os resultados da ferramenta e do programa WAsP.....	64

Índice de Anexos

Anexo A.1. - Tabelas de análise de erro individual para estação A.....	79
Anexo A.2. – Tabela de análise de erro individual para a estação B.	79
Anexo A.3. – Tabela de análise de erro individual para a estação C.	79
Anexo A.4. – Tabela de análise de erro individual para a estação D.....	79
Anexo B.1. – Tabela de análise de erro individual para o compósito WAsPMultiComp.....	80
Anexo B.2. – Tabela de análise de erro individual para o compósito WindSimMultiComp.....	80
Anexo B.3. – Tabela de análise de erro individual para o compósito WindSimComp.....	80
Anexo C.1. – Mapas de recurso obtidos do compósito gerado pelas estações tse08 e tse11 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.	82
Anexo C.2. – Mapas de recurso obtidos do compósito gerado pelas estações rsw06, rsw07 e rne07 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.	83
Anexo C.3. – Mapas de recurso obtidos do compósito gerados pelas estações tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne07 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.....	84
Anexo C.4. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Euclidiana.....	85
Anexo C.5. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Euclidiana a três dimensões.	85
Anexo C.6. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Manhattan.....	85

Anexo C.7. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Minkowsky com $p=0.5$	86
Anexo C.8. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Minkowsky com $p=1.5$	86
Anexo C.9. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Minkowsky com $p=4$	86
Anexo C.10. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Chebyshev.	87
Anexo C.11. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Euclidiana.	87
Anexo C.12. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Euclidiana a três dimensões.	87
Anexo C.13. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Manhattan.	88
Anexo C.14. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=0.5$	88
Anexo C.15. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=1.5$	88
Anexo C.16. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=4$	89
Anexo C.17. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Chebyshev.	89
Anexo C.18. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Euclidiana.	89
Anexo C.19. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Euclidiana a três dimensões.	90
Anexo C.20. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Manhattan.	90
Anexo C.21. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=0.5$	90
Anexo C.22. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=1.5$	90
Anexo C.23. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=4$	91
Anexo C.24. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Chebyshev.	91
Anexo C.25. – Regressão linear obtida do compósito gerado pelas estações tse08 e tse11 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.	92
Anexo C.26. – Regressão linear obtida do compósito gerado pelas estações rsw06, rsw07 e rne07 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.	93
Anexo C.27. Regressão linear obtida do compósito gerado pelas estações tse08, tse11 rsw06, rsw07 e rne07 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.	95
Anexo D.1. – Diagrama de Rosa dos ventos e função densidade extraídos do WAsP para todas estações estudadas.	98

Simbologia e notações

WWEA	World Wind Energy Agency
IEA	International Energy Agency
NEWA	New European Wind Atlas
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
CFD	Computational Fluid Dynamics
WFDT	Wind Farm Design Tool
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
LiDAR	Light Detection And Ranging
DBS	Doppler beam swinging
QuikSCAT	Quick Scatterometer
NCAR	National Center for Atmospheric Research
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
IEC	International Electrotechnical Commission
RIX	Ruggedness Index
MAE	Erro Absoluto Médio
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
MSE	Erro Quadrático Médio
MAPE	Erro Absoluto Médio Normalizado
wrg	Wind Resource Grid
GUI	Guide User Interface
θ_{crit}	Declive crítico (°)
l	Altura da região interna para qual existe equilíbrio da turbulência (m)
Z_0	Comprimento da rugosidade da superfície (m)
h_m	Altitude (m)
k	Fator de forma (adimensional)
c	Fator de escala (m/s)
V	Velocidade do vento (m/s)
u	Velocidade média do vento (m/s)
t	Tempo (s)
$U(z)$	Velocidade do vento à altura z (m/s)
z_{ref}	Altura de referência (m)
α	Shear factor
E_c	Energia cinética do vento (J)
m	Massa de ar (kg)
A	Área do rotor (m ²)
ρ	Densidade (kg/m ³)
P_d	Potência disponível
pd	Fluxo de potência (W/m ²)
η_{max}	Rendimento máximo (W)
P	Potência máxima (W)
P_{inc}	Potência incidente (W)
C_p	Coeficiente de potência
P_t	Potência extraída pela turbina (W)
x	Variável independente
y	Variável dependente
β_0	Intersecção da reta na origem
β_1	Declive da reta
ϵ	Erro aleatório ou estocástico

D_i	i-éssima distância entre cada par de estações anemométricas (m)
z_{est}	Altitude da estação anemométrica para qual foi estimada a velocidade do vento (m)
z_{obs}	Altitude da estação anemométrica que observou a velocidade do vento (m)
Δz_i	i-éssima diferença de altitude entre estações anemométricas (m)
ΔRIX	Diferença de RIX
RIX_{est}	RIX do local estimado
RIX_{obs}	RIX do local observado
Δv_i	i-éssima velocidade entre cada par de estações anemométricas (m/s)
A	Amplitude do viés

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) por disponibilizar os meios para a elaboração desta dissertação e às pessoas que estiveram envolvidas nesta tese. Também gostaria de agradecer ao projeto NEWA pela disponibilização dos dados de vento da Serra do Perdigão utilizados nesta dissertação.

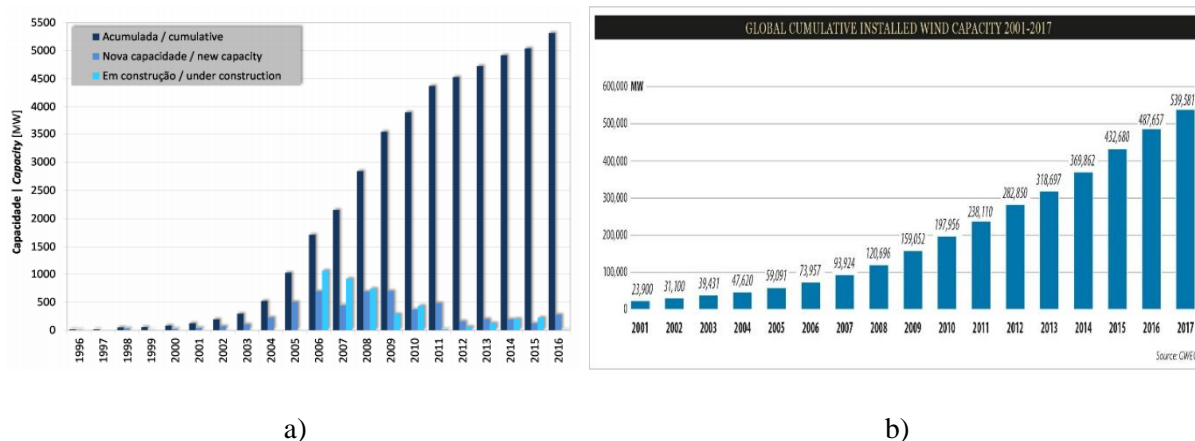
Esta dissertação não seria possível sem o apoio da minha família. Obrigado por acreditarem em mim e tornarem este sonho possível. Um agradecimento em especial para a Stanislava que esteve ao meu lado durante este período, o seu suporte e motivação foi imprescindível na elaboração da dissertação.

1. Introdução

1.1. Motivação

Desde 1996, Portugal tem vindo sucessivamente a instalar turbinas eólicas (Figura 1.1-a) tendo em 2015 ultrapassado o marco histórico dos 5 GW. Segundo a Direção Geral de Energia e do Ambiente, em dezembro de 2018 totalizou 5.380 GW [1] fazendo, atualmente, parte do top 16 dos países com maior capacidade instalada [2].

Segundo dados recentes pela *World Wind Energy Agency* (WWEA) a estimativa de capacidade eólica instalada mundialmente é de 539 GW [3, 2] (Figura 1.1 -b) o que quer dizer que centenas de milhares de turbinas estão a converter a energia do vento em energia elétrica.



Atualmente, considerando um potencial eólico global de 94.9 TW [4] apenas cerca de 0.5% desse potencial encontra-se instalado e existe ainda uma grande capacidade teórica de energia eólica por ser aproveitada.

Com as projeções de crescimento e geração de custos das tecnologias renováveis, em [5], os autores concluíram que o crescimento da penetração das fontes de energia renováveis terão de ser obrigatórias globalmente de forma a reduzir a ponte entre a procura e oferta para que deixemos de ter um impacto tão elevado no ambiente. Segundo a publicação “Wind 2013 Roadmap”, pela International Energy Agency (IEA), cria um interessante cenário onde a meta global para 2030 e 2050 de capacidade instalada esteja entre os 1400 GW e 2300 GW, respetivamente [6].

De forma a que estas projeções se tornem numa realidade é importante que se continuem a desenvolver modelos de caracterização do vento o mais fiáveis possíveis de forma a minimizar os custos e maximizar os investimentos no sector do vento.

Os riscos no investimento de projetos eólicos estão diretamente associados à precisão com que é feita a estimativa da produção anual de energia que será gerada pelo parque eólico. Os investimentos nestes projetos são baseados no rendimento anual de energia, que é um fator fundamental para a análise da viabilidade de um parque eólico.

Para a construção de parques eólicos, em áreas de dimensão média a elevada, em terrenos de orografia complexa, é necessário a fazer um estudo preciso do recurso eólico. Devido a constrangimentos económicos entre outros, a avaliação do recurso eólico é usualmente baseada em dados experimentais provenientes de apenas uma estação anemométrica. Através do método tradicional

na caracterização do potencial eólico em terrenos complexos, pode-se verificar desvios significativos na estimativa espacial dos parâmetros do vento e, consequentemente, na estimativa de produção energética de parques eólicos. Nestes terrenos o vento tem um comportamento não regular e os parâmetros de rugosidade, orografia e turbulência daí resultante têm um impacto maior do que o desejado para a caracterização do potencial eólico. Com a instalação de múltiplas estações anemométricas e utilização de metodologias que utilizem estes dados de forma conjunta, é possível analisar o recurso eólico num terreno de orografia complexa sem recorrer a programas de simulação exigentes computacionalmente.

Com os locais típicos para instalação de turbinas eólicas, locais com altitude média a elevada e com velocidade elevada e homogénea, a ficarem cada vez mais escassos, os promotores de energia eólica, procuram soluções em locais não tão apelativos, ou a substituição de outras turbinas eólicas com tecnologia mais moderna, de maior dimensão e maior eficiência, o que obriga a novas avaliações da viabilidade energética dos locais de interesse, o que, em terrenos de elevada complexidade continua a ser um desafio. Em [7] o autor faz um levantamento de vários estudos e projetos que tem como objetivo a compreensão do fluxo atmosféricos em terrenos complexos. Nomeadamente o projeto New European Wind Atlas (NEWA), este projeto tem como objetivos principais criar um novo e gratuito atlas do vento cobrindo a Europa e a Turquia, realizar uma série de experiências sobre o escoamento em diferentes tipos de terrenos complexos de forma a validar modelos para o desenvolvimento de projetos eólicos e o próprio atlas Europe, e criar uma base de dados de publicações e dados para a indústria e comunidade científica [8].

O Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) desenvolveu uma metodologia (ToolComplex [9]) para terrenos com orografia complexa tendo como base a estimativa espacial do recurso eólico recorrendo a várias estações anemométricas, a qual permite descrever de forma mais precisa o escoamento atmosférico em terrenos com estas características. Neste trabalho pretende-se validar e melhorar esta metodologia através da aplicação a um elevado conjunto de estações anemométricas, e consequentemente validar a ferramenta ToolComplex desenvolvendo uma interface gráfica. Pretende-se ainda implementar novos métodos estatísticos de interpolação espacial, criando uma ferramenta autónoma e intuitiva para o utilizador. Esta ferramenta poderá ser utilizada como apoio à caracterização do vento em terrenos de elevada complexidade, tendo como base dados provenientes de diversos pontos de medição na área de estudo.

1.2. Objetivos

Neste trabalho pretende-se testar a metodologia desenvolvida pelo LNEG através da aplicação de diferentes distâncias e com um elevado conjunto de dados provenientes de múltiplas estações anemométricas, com vista à identificação da melhor métrica a aplicar no cálculo do inverso da distância entre pontos através da análise dos resultados obtidos. Este método será implementado numa interface gráfica desenvolvida em Matlab [10] com o objetivo de funcionar como uma ferramenta de trabalho autónoma no mapeamento do recurso eólico em terrenos de orografia complexa. Esta ferramenta será uma mais valia para o setor eólico pois permite obter um mapeamento do potencial eólico mais fidedigno em terrenos complexos onde as variações na velocidade do vento são significativas originando, na maioria dos casos, sobre estimativas do potencial eólico.

1.3. Organização da dissertação

No capítulo 1 é dado um contexto energético do crescimento do setor eólico em Portugal e no mundo e quais as expectativas da área. São explicadas as diversas dependências que existem na implementação de um projeto eólico e onde a tese se enquadra nesse panorama.

No capítulo 2 contém o estado da arte para a caracterização do recurso eólico onde são exploradas as metodologias para a avaliação do recurso eólico, mapeamento do recurso eólico com base em múltiplas fontes de informação e quais a abordagens utilizadas em terrenos complexos.

O capítulo 3 é constituído pela componente teórica relevante para a compreensão das metodologias estudadas e interpretação de resultados obtidos. Nomeadamente são apresentados os aspetos mais importantes do vento para terrenos com orografia complexa e os cálculos a considerar na análise de resultados assim como os métodos estatísticos utilizados.

O capítulo 4 é apresentada a metodologia aplicada e a ferramenta desenvolvida. Neste capítulo são avaliados os parâmetros de estudo assim como os métodos para comparação dos mapas de recurso, distâncias utilizadas e número de estações anemométricas.

O capítulo 5 corresponde aos resultados obtidos da aplicação da metodologia apresentada e análise dos mesmos. São apresentados dois casos de estudo onde no primeiro caso de estudo contém uma análise mais completa por existir uma maior disponibilidade de estações anemométricas.

Com o capítulo 6 pretende-se sintetizar os resultados obtidos no capítulo 5 procurando possíveis correlações entre os mesmos tentando explicar alguma incongruência observada.

Finalmente, o capítulo 7 contém as conclusões da dissertação onde tem como objetivo identificar as principais observações previamente retiradas e analisar futuros desenvolvimentos da metodologia aplicada.

2. Estado da arte para a caracterização do recurso eólico

2.1. Metodologias para avaliação do recurso eólico

A avaliação do potencial eólico é o mais importante passo, de qualquer projeto de instalação de uma turbina ou parque eólico, é através deste que se determina a viabilidade energética e económica de um projeto. De forma a proceder a uma correta avaliação do recurso eólico é necessário levar a cabo medições da velocidade do vento num dado local durante um longo período de tempo. Para se obter uma elevada precisão na caracterização do recurso eólico a campanha experimental poderá levar anos, no entanto o tempo mínimo recomendado para a recolha dos dados deve ser de pelo menos 12 meses, e, desejavelmente, mais longa (>36 meses), de forma a obter estimativas tão representativas quanto possível do vento de longo termo [11]. A precisão na medição tem um papel fundamental na avaliação do potencial eólico, pois é um passo fundamental para uma correta estimativa da produção energética de um parque eólico.

Existem vários modelos para a avaliação do potencial eólico de um dado local bem como para o cálculo da estimativa de produção de parques eólicos. Da mesma forma, é possível recorrer a modelos de otimização de posicionamento espacial de turbinas eólicas de forma a aproveitar ao máximo, no terreno disponível, os locais energeticamente mais favoráveis. Alguns dos modelos mais conhecidos e utilizados para a avaliação do potencial eólico são o *Wind Atlas Analysis and Application Program* (WAsP) [12], *WindSim* [13] e *WindPro* [14]. Para a otimização do posicionamento das turbinas eólicas no terreno, um dos modelos mais usados no setor eólico é o *WindFarmer* [15].

Nesta dissertação, pretende-se que a metodologia multi-estação desenvolvida e a interface criada possam ser utilizadas de forma independente, sendo os seus resultados utilizados como dado de entrada em vários modelos e avaliação do potencial eólico – WAsP, *WindFarmer*, modelos CFD, entre outros.

2.1.1. Modelo linear – WAsP

A metodologia utilizada no programa WAsP foi desenvolvida pelo laboratório RISOE e encontra-se descrita em detalhe no *European Wind Atlas* [16]. Este é amplamente utilizado na indústria para avaliação do recurso eólico, posicionamento de turbinas e produção energética de turbinas e parques eólicos. Através desta metodologia com a informação relativa à velocidade do vento de um dado local, informação sobre a orografia, rugosidade e obstáculos ao escoamento atmosférico, é possível determinar os parâmetros estatísticos do vento para outro ponto da mesma região.

Assim, através de uma campanha de medição da velocidade e direção do vento, das características do local, coordenadas e caracterização da orografia do terreno, rugosidade, obstáculos, e altura de medição, o WAsP calcula as estatísticas do vento tendo como base a divisão por classes de velocidade e direção ajustando-as a uma distribuição de *Weibull*.

O programa WAsP contém vários modelos integrados, tais como modelos de escoamento para integrar os efeitos locais da orografia do terreno e modelo de camada limite interna para as alterações da rugosidade do terreno [16, 17]. Originalmente o WAsP não continha modelos não lineares, mas como mostra na literatura [18] os modelos *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tendem a mostrar resultados com menores desvios em terrenos complexos. Assim sendo, o WAsP disponibilizou uma versão não linear baseada em CFD – WAsP-CFD – melhor adaptado a este tipologia de terreno.

2.1.2. Modelo não linear - WindSim

O WindSim consiste num modelo de base CFD para a avaliação do potencial eólico e estimativa de produção energética de Parques Eólicos (*Wind Farm Design Tool - WFDT*). Este é utilizado para estimar a produção de energia de um parque eólico efetuando os cálculos necessários de forma a otimizar o mesmo, no sector de energia eólica este procedimento é normalmente referido como *micrositting*. O WindSim trabalha através de módulos, onde alguns módulos operados sequencialmente. Existem seis módulos no total no processo de utilização do WindSim:

- 1) *Terrain* – módulo inicial que estabelece um modelo numérico do terreno baseado em dados de orografia e rugosidade (ficheiros dxf, .grid, .xyz,, etc);
- 2) *Wind Fields* – módulo que calcula o campo de vento;
- 3) *Objects* – módulo onde é se colocam as turbinas existentes no terreno e os ficheiros de climatologia (.tab, etc);
- 4) *Results* – módulo que analisa numericamente o campo de vento;
- 5) *Wind Resource* – módulo que através de métodos estatísticos elabora o mapa de recurso do vento (.wrg) com a junção dos cálculos numéricos do campo de vento e da climatologia;
- 6) *Energy* – módulo que através de métodos estatísticos estima a produção anual de energia (AEP), inclui perdas de wake e determina as características do vento para a carga da turbina.

O *WindSim* pode ser classificado como um modelo CFD - *Computational Fluid Dynamics*. Os modelos CFD recorrem a métodos de análise numérica que usam estruturas de dados para resolver equações fundamentais que envolvam escoamento de fluidos.

Os modelos não lineares resolvem numericamente as equações de Navier-Stokes integrando assim a componente tridimensional do comportamento dos fluidos que os modelos lineares simplificam [19, 20, 21] . Com estes modelos é possível identificar fenómenos de recirculação do vento, estudar a turbulência entre outros fenómenos do escoamento atmosférico. Assim sendo, este tipo de modelos são matematicamente mais precisos e viáveis para terrenos complexos [19, 22]. Vários estudos já foram feitos comparando estes modelos a modelos lineares [18, 21, 23] que mostram que estes conseguem simular de forma mais precisa na presença de declives elevados e variações significativas em altitude [20].

Os modelos CFD mais comuns resolvem as equações *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), permitindo obter a magnitude da velocidade nas suas três componentes, a pressão estática, os campos de turbulência de energia cinética, e a dissipação da turbulência através do modelo *K-Epsilon* [18, 24, 25]. Outro modelo de CFD bastante utilizado para a resolução de problemas com terrenos complexos é o *Large-Eddy Simulation* (LES). Este modelo foi adotado para simular terrenos complexos e além de resolver as condições de camada limite [26, 27] também oferece soluções do escoamento do vento mais detalhadas [20, 26]. No entanto os modelos não lineares são conhecidos na literatura como computacionalmente dispendiosos [18, 20, 24, 26, 22].

Na presença de dados provenientes de várias estações anemométricas o *WindSim* utiliza um método multi-estação presente no módulo “*Wind Resource*” [28] para a avaliação do potencial eólico, no entanto, obriga a que o utilizador recorra a este modelo para efetuar todo o processo de avaliação do potencial eólico e estimativa de produção energética.

2.2. Mapeamento de potencial eólico com base em múltiplas fontes de dados

Além da metodologia apresentada em [9] e do método multi-estação presente no módulo “*Wind Resource*” existem alguns casos de estudos de caracterização do vento que utilizam uma abordagem multi-estação. Nomeadamente, um estudo de meso-escala efetuado na Venezuela em 2014 [29] onde, utilizando observações medidas no local de 34 estações anemométricas efetua uma interpolação espacial das observações com aplicação da metodologia de Kriging e efetua correções orográficas baseadas na diferença de altura e de velocidade entre os pontos da grelha obtendo resultados que sugerem o aproveitamento comercial do recurso eólico no norte da Venezuela.

Outro caso de estudo compara uma metodologia multi-LiDAR e observações do método “*Doppler beam swinging*” (DBS) em terrenos complexos [30]. Uma observação interessante presente neste relatório é quando o autor diz que para resolver o problema de precisão nas medições efetuadas em terrenos complexos seria, intuitivamente, adicionar múltiplos pontos de observação. Este conclui através da comparação dos resultados obtidos de várias combinações das observações provenientes da análise multi-LiDAR contra as observações do método DBS que existem vantagens significativas na técnica multi-LiDAR na caracterização do vento em terrenos complexos. A técnica multi-LiDAR é utilizada com recorrência na literatura para complementar leituras provenientes do método DBS que assumem um fluxo homogêneo. No caso de estudo de caracterização da turbulência de uma turbina eólica sob diferentes condições [31] é utilizada esta mesma técnica referindo a sua utilidade e flexibilidade.

É apresentada uma metodologia multi-estação para previsão de curto prazo da energia do vento em [32] onde é efetuada a comparação do modelo implementado a modelos de previsão previamente utilizados como modelo de persistência e o modelo “*Grey predictor*”. Os resultados da metodologia multi-estação mostra melhoria de resultados face aos modelos comparados, consequentemente melhorando a previsão da energia do vento. Em [33] é apresentado um estudo de modelação da direção do vento com base em dois pontos de observação onde verificam pequenas melhorias nos resultados finais em comparação com o modelo de persistência.

De 2008 a 2012 decorreu o projeto NORSEWinD com o âmbito criar atlas do vento de alta qualidade para os mares do norte, irlandês e báltico através de LiDARs, anemómetros, satélites combinados com modelação de meso-escala [34]. Em os autores descrevem as metodologias de medição, controlo de qualidade e gestão de informação dos múltiplos LiDAR’s instalados ao longo do mar nórdico. Foram instalados oito LiDAR’s dos quais cinco tiveram excelente comportamento, dois aceitáveis e apenas um não cumpriu com os *standards* do projeto NORSEWinD. O LNEG foi um dos parceiros deste projeto onde, por exemplo, em [35] utilizaram uma técnica de assimilação de relaxamento Newtoniana para combinar informação proveniente de múltiplas fontes, nomeadamente dados de velocidade do vento através de satélites QuikSCAT e dados de temperatura à superfície do mar proveniente de uma análise diária. Os resultados foram validados através das observações do mastro meteorológico concluindo que a componente de temperatura do mar melhorou ligeiramente a qualidade dos dados referindo um maior impacto no período de verão do que no período de inverno.

Outro projeto relevante, foi o projeto NEWA, o qual tem como objetivo a criação de um novo atlas do vento europeu e a disponibilização de uma base de dados experimentais para teste de modelos e outros trabalhos de investigação e desenvolvimento tecnológico. Para tal, foram realizadas experiências em várias localizações com características diferentes tais como: RUNE, Østerild, Hornamossen, Kassel, Perdigão, Aliaz e, por fim, uma experiência ao longo do mar Báltico (Figura 2.1- a). Comum a todas as experiências será o uso de sistemas LiDAR e outros equipamentos de elevada precisão para complementar e, em alguns casos, substituir os mastros meteorológicos [8]. Previamente à campanha do projeto NEWA na Serra do Perdigão em 2017, houve uma campanha de preparação em 2015 onde também foi utilizada uma metodologia multi-estação com seis sensores *WindScanner*¹, três de curto

¹ Instrumento de elevada precisão baseado na tecnologia LiDAR o qual permite medir as três componentes da velocidade do vento a distâncias médias e elevadas

alcance e outros três de longo [36]. A campanha de 2015 foi parcialmente financiada pelo projeto NEWA onde um dos objetivos da campanha foi então a medição do recurso eólico ao longo da cumeada onde existem ocorrências atmosféricas de separação de fluxo e brisas de vales de montanha. Os resultados da experiência e a metodologia apresentada serviu de base para a implementação do projeto NEWA em 2017. Sem dúvida, uma das maiores contribuições para o projeto NEWA foi na Serra do

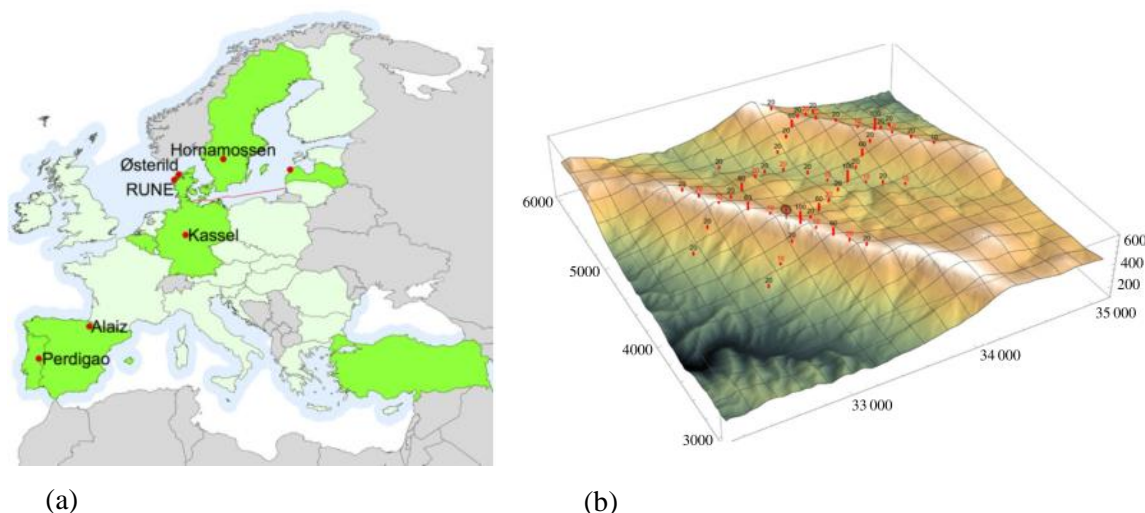


Figura 2.1 - (a) Locais da experiências do projeto NEWA; (b) dupla cumeada no Perdigão, orografia do terreno e disposição das estações a vermelho. Fonte: [8]

Perdigão, onde se encontra uma dupla cumeada paralela (Figura 2.1- b) sendo possível estudar inúmeros fenómenos atmosféricos. Esta campanha decorreu em 2017 de Setembro até ao final de Abril e teve à sua disposição 50 mastros meteorológicos com alturas dos 10 aos 100 m, 15 LiDARs para o mapeamento da área, ver figura 2b. Além disso um grupo de universidades Americanas juntamente com National Center for Atmospheric Research (NCAR) estarão envolvidas nesta experiência trazendo uma grande variedade de instrumentos incluindo sonics, LiDARs Doppler, LiDARs caracterização de humidade, radar Doppler de perfil, sondas radio e sensores de pressão.

Em suma, verifica-se que a utilização de técnicas com múltiplos pontos de observação tendem a mostrar resultados mais satisfatórios que uma análise clássica com uma estação anemométrica.

2.3. Terrenos complexos

Cada vez mais, a indústria do vento mostra interesse na compreensão do comportamento do vento sobre terrenos complexos.

Os locais típicos para a instalação de turbinas eólicas, em terra, são na zona costeira, em superfícies planas ou no cimo de montanhas com configurações simples e orientadas de forma perpendicular à direção dominante do vento. Também é possível instalar turbinas eólicas *offshore* onde as condições do vento são bastante adequadas. Estes Parques Eólicos não estão ainda muito disseminados devido ao constrangimento económico associado à tecnologia, instalação e manutenção.

Com a recente entrada em consulta pública do Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC) 2030 prevê-se que a capacidade eólica deva atingir um valor entre os 8.1GW e 9.2GW. Para atingir esta meta além do sobre equipamento das atuais turbinas eólicas, é da máxima importância, estudar novos locais para a instalação de turbinas eólicas.

2.3.1. Indicador de complexidade de terreno – RIX

O termo “terreno complexo” está muitas vezes associado com várias características do terreno tais como a orografia, florestação, rugosidade entre outras. Como referido anteriormente, os terrenos complexos podem ser melhor descritos através de modelos CFD. Ainda assim, e sendo amplamente utilizados os modelos lineares para avaliação do potencial eólico em terrenos complexos surgiu a necessidade de classificar a complexidade/rugosidade do terreno.

O efeito da orografia de um terreno no escoamento do vento é referida repetidamente na literatura. Como meio de quantificar a influência da orografia no escoamento atmosférico foram efetuadas várias tentativas para um criar um indicador geral. Nomeadamente, no *European Wind Atlas* [16] foi utilizado o *relative relief* para quantificar o grau da fiabilidade dos mapas de recurso. O *relative relief* é a diferença entre os níveis mais altos e mais baixos em unidades de áreas de 100 km². O programa *WAsP* adotou o *ruggedness index* (RIX), este é apresentado como uma medida de complexidade de um dado terreno. O RIX é definido como a fração do terreno onde a declividade é maior que o declive crítico [37]. O declive crítico é o declive pelo qual se considera a forte possibilidade de existir separação de fluxo em algum sector. Segundo Wood em [38], onde estuda o efeito da separação de fluxo em simples simulações numéricas em duas e três dimensões, chega a um declive mínimo (declive crítico) onde é provável que ocorra uma separação de fluxo. É obtida uma relação para o cálculo do declive crítico, θ_{crit} , declive que torna suscetível a separação do fluxo do vento. O declive crítico vai depender da forma da zona montanhosa:

$$\theta_{crit} = \frac{\left(\log\left(\frac{l}{Z_0}\right)\right)^2}{\left(\log\left(\frac{h_m}{Z_0}\right)\right)^2 \cdot \left(2 + \frac{4.2}{\log\left(\frac{l}{Z_0}\right)}\right)} \quad [2.1]$$

Equação 2.1 - Cálculo do ângulo crítico.

Onde, l e h_m são escalas de altura derivadas da análise linear presente no estudo e Z_0 é o comprimento da rugosidade da superfície.

Bowen e Mortensen em [37] concluem que existe uma relação entre o sinal e a magnitude aproximada do erro previsto devido aos efeitos orográficos e a diferença de RIX entre a previsão e o local de referência.

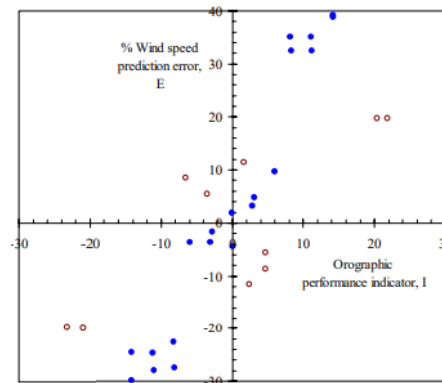


Figura 2.2 - Traçado do erro da previsão do WAsP e o indicador de avaliação orográfico. Os círculos preenchidos correspondem a pares monte-monte os círculos vazios a pares planície-monte; Fonte: [37]

Embora o RIX não seja um indicador adotado por toda a indústria do vento, estudos mais recentes recorrem ao RIX para interpretar melhor os seus resultados em zonas de terreno complexo [39, 40]. Tendo em conta os resultados obtidos nesta dissertação e os resultados presentes em [37] implementou-se RIX na interface desenvolvida.

3. Aspetos Teóricos do Vento

3.1. Avaliação do potencial eólico

A caracterização do recurso do vento é dos passos mais importantes em projetos de energia eólica visto que este é o “combustível” das turbinas eólicas, a caracterização do vento numa região deve ser feita através da análise da distribuição e direção da velocidade do vento, topografia, turbulência e o gradiente do vento ao longo de séries anuais de dados. A quantificação do recurso num dado local já não é uma tarefa por si só simples, torna-se mais complicada quando as condições do terreno envolvente não são ótimas. Nomeadamente em terrenos complexos um grande número de fenómenos atmosféricos que ocorrem ao mesmo tempo implicando desvios significativos na estimativa espacial dos parâmetros do vento e, na estimativa de produção energética.

3.1.1. Brisas de montanha e de vale

Localmente a distribuição do vento em Portugal é fortemente influenciada pela ocorrência de brisas. No litoral os ventos da brisa marítima tendem a ser mais fortes durante a tarde e mais fracos à noite com a brisa continental, este efeito é mais fácil de verificar no verão pois é a estação onde o gradiente de temperatura é maior e as brisas são mais fortes e com direção predominante noroeste.

No entanto em locais montanhosos, tipicamente terrenos de orografia complexa, existem efeitos de brisa locais que influenciam fortemente o escoamento do fluxo do vento. A este efeito chamamos de brisas de montanha e vale. Estas brisas ocorrem ciclicamente devido ao gradiente de temperatura nas encostas da montanha onde durante o dia o aquecimento gera uma aceleração do vento com direção ao topo e à noite com o arrefecimento da encosta com direção ao vale [41].

3.1.2. Distribuição da velocidade do vento

Sendo que a velocidade do vento é variável ao longo do tempo é necessário agrupar as diferentes intensidades do vento em classes e registar a sua frequência de ocorrência. Justus et al. e Wentink desde 1976 que aplicam a distribuição de *Weibull* para ajustar a curva a uma função distribuição cumulativa dos dados do vento [42, 43]. A distribuição da velocidade do vento pode ser tipicamente descrita pela função de densidade de probabilidade de *Weibull* que se pode calcular através da Equação 3.1 [44].

$$f(V; c, k) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}, & V \geq 0 \\ 0, & V < 0 \end{cases} \quad [3.1]$$

Equação 3.1 - Função de Densidade de Probabilidade de Weibull

Onde, $f(u)$ representa a ocorrência de uma determinada classe de ventos, c é o fator de escala (m/s), k o fator de forma (adimensional) e V a variável a ser medida, neste caso, a velocidade do vento (m/s). c e k são os dois parâmetros da função de *Weibull*. O parâmetro de escala c é calculado através da seguinte equação:

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad [3.2]$$

Equação 3.2 - Parâmetro de escala c

Onde \bar{V} representa a velocidade média do vento medida à altura do sensor, e Γ representa a função gamma que é calculada pela seguinte equação:

$$\Gamma(x) = \int_0^1 \left[\ln\left(\frac{1}{t}\right) \right]^{x-1} dt \quad [3.3]$$

Equação 3.3 - Função gama (Γ)

Onde neste caso temos que $x = \left(1 + \frac{1}{k}\right)$.

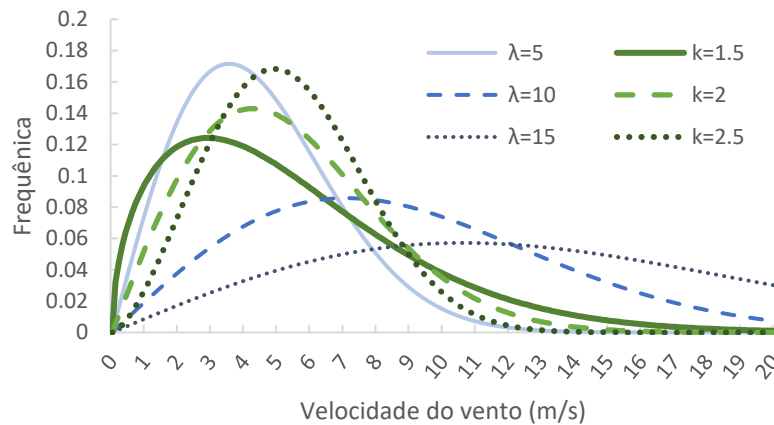


Figura 3.1 - Função de densidade de Weibull para a variação do parâmetro λ o valor de k é igual a 2, e para a variação do parâmetro k o valor de λ é igual a 6 m/s.

De forma a entender como o fator de escala afeta a distribuição de *Weibull* podemos observar a Figura 3.1 onde existem três curvas diferentes para c igual a 5, 10 e 15 m/s. Podemos verificar que com um c superior obtêm-se distribuições com valores de velocidade maior, no entanto as velocidades do vento são menos constantes.

O fator de forma k tipicamente representa um valor perto de 2 [45, 46], a *International Electrotechnical Commission* (IEC) especifica o uso da distribuição de ventos de *Rayleigh* que é igual a um caso específico da distribuição de *Weibull* com parâmetro $k=2$ [47]. Através da figura verifica-se que à medida que o fator de forma aumenta o máximo da curva desvia-se para a direita.

Um exemplo, no caso de estudo feito em Vredendal, África do Sul (Figura 3.2) onde se verifica que o histograma das medições efetuadas ultrapassam o máximo da curva ajustada.

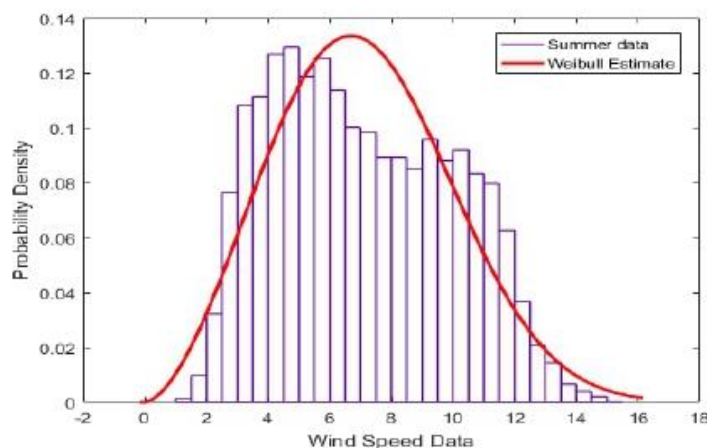


Figura 3.2 - Histograma e curva ajustada de Weibull. Fonte: [45]

No programa *WAsP* obtemos um diagrama dividido em 12 sectores apenas com a frequência da direção, mas em complemento para a análise da velocidade do vento, inclui um gráfico da função de densidade de probabilidade de *Weibull* (Figura 3.3 – a), assim como, a função de densidade de *Weibull* ajustada para cada sector (Figura 3.3 – a). Na figura verifica-se que o sector 11 está selecionado e a distribuição da frequência da velocidade do vento acompanha o diagrama à sua esquerda. De forma geral o diagrama da rosa-dos-ventos dá-nos a informação das direções com maior frequência de ventos e as velocidades mais frequentes, idealmente o diagrama apresentará uma direção predominante.

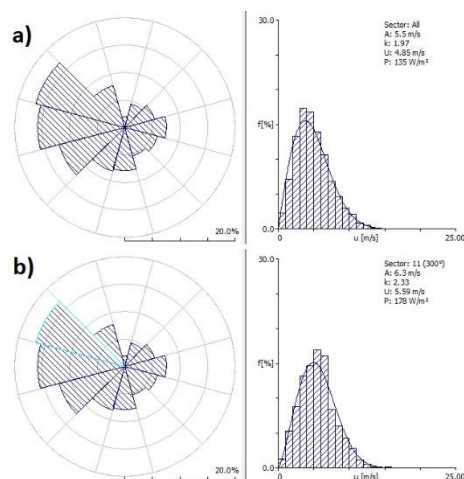


Figura 3.3 - Diagrama rosa-dos-ventos gerado pelo *WAsP*; a) diagrama à esquerda e FDP de Weibull à direita; b) sector 11 selecionado à esq. e a FDP de Weibull para o sector 11 à dir.

3.1.3. Gradiente do vento

O vento é resultante das diferenças de pressão causadas pelo aquecimento irregular do sol ao longo da superfície terrestre. Ao seja, o vento é um produto da energia solar. Um exemplo da irregularidade da absorção da radiação solar é na zona do equador onde é fortemente absorvida ao contrario dos polos onde a absorção é menor. A circulação da atmosfera que resulta do aquecimento desproporcional é também influenciada fortemente pela rotação da terra. A variação espacial na transferência de calor criam uma variação na pressão atmosférica que causa o deslocamento do vento das pressões altas para baixas. Predominantemente, o vento desloca-se na horizontal pois os gradientes de pressão na vertical tendem a ser cancelados pela força gravitacional. Com o deslocamento do vento devido à diferença de pressão a força de Coriolis começa a ter efeito perpendicularmente na deslocação do vento. Quando existe um balanço entre a força da pressão do ar com a força de Coriolis o vento resultante é chamado de vento geostrófico. Com a aproximação do vento à superfície terrestre a força de fricção tem um papel relevante, onde o solo é visto como uma superfície que bloqueia e absorve o momento do vento – os efeitos de microescala do terreno e da rugosidade da superfície podem afetar significativamente o vento [41].

O gradiente do vento é a diferença da velocidade ou direção do vento descrita verticalmente ou horizontalmente. Dentro da camada limite atmosférica, camada existente devido a viscosidade e arrastamento do ar junto à superfície da Terra, o gradiente do vento vertical pode ser descrito por uma função de potência ou logarítmica como nas Equação 3.4 e Equação 3.5 respetivamente.

$$\frac{U(z)}{U(z_{ref})} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad [3.4]$$

Equação 3.4 - Função de Potência

$$\frac{U(z)}{U(z_{ref})} = \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{ref}/z_0)} \quad [3.5]$$

Equação 3.5 - Gradiente do vento vertical com função logarítmica

Onde $U(z)$ é a velocidade do vento à altura z , z_{ref} é uma altura de referência e α é o expoente do gradiente do vento ou *shear factor* que pode ser calculado através da equação 6.

$$\alpha = \frac{\log(u_2/u_1)}{\log(z_2/z_1)} \quad [3.6]$$

Equação 3.6 - Cálculo do shear factor

Na função logarítmica, z_0 corresponde à altura da rugosidade equivalente.

3.1.4. Potência

Uma massa de ar em movimento a uma dada velocidade transporta energia que pode ser representada pela Equação 3.7,

$$E_c = \frac{1}{2} m u^2 \quad [3.7]$$

Equação 3.7 - Energia cinética do vento

onde, E_c [J] é a energia cinética do vento, m [kg] é a massa de ar e u é a velocidade [m/s]. Dado que a massa de ar irá passar por uma turbina com uma área do rotor A e essa mesma massa de ar tem uma densidade ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$, a potência disponível, P_d [W], do vento é dada por:

$$P_d = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^2 \frac{du}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad [3.8]$$

Equação 3.8 - Potência disponível do vento [49].

Normalmente os valores obtidos são apresentados por unidade de área obtendo então um fluxo de potência $\left[\frac{W}{m^2}\right]$:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho u^3 \quad [3.9]$$

Equação 3.9 - Fluxo de potência

Segundo a lei da conservação de energia, quando a massa de ar atravessa a secção transversal do rotor da turbina a velocidade da mesma diminui, convertendo a energia cinética em energia mecânica pela rotação das pás.

Contudo, a energia cinética não pode ser completamente convertida em energia mecânica, assumindo este princípio, o físico alemão Albert Betz [49] quantificou o limite teórico do aproveitamento máximo de energia que se pode extrair do vento:

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{\frac{8}{27} \rho A u_1^3}{\frac{1}{2} \rho A u_1^3} = \frac{16}{27} \cong 59.3\% \quad [3.10]$$

Equação 3.10 – Limite de Betz: rendimento máximo teórico do aproveitamento do vento por uma turbina.

O cálculo da potência extraída pela turbina pode ser calculada através da Equação 3.11 com a inserção do coeficiente de potência, C_p .

$$P_t = C_p \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad [3.11]$$

Equação 3.11 - Potência extraída pela turbina

O limite de Betz introduz assim o conceito de coeficiente de potência. No entanto, o valor calculado na Equação 3.10 é apenas um valor teórico que é calculado em condições ideais e, portanto, a potência extraída do vento será sempre menor ao limite de Betz.

3.2. Métricas de Avaliação de Erro

3.2.1. Viés

Na literatura existem alguns indicadores que são utilizados com maior frequência para avaliar um modelo ou um método estatístico para previsão eólica [51, 23]. Quando se obtém um conjunto de dados através de métodos estatísticos, comparando a observações diretas, os valores estimados podem ser diferentes, a diferença entre os dados observados e os dados estimados é chamado de erro.

$$Viés = \hat{X} - X \quad [3.12]$$

Equação 3.12 - Cálculo do erro

Onde $Viés$ é o erro, \hat{X} é o valor estimado e X o valor observado. Portanto, um valor positivo do $Viés$ significa uma sobre estimação do valor observado, um valor negativo por sua vez uma subestimação do valor observado.

3.2.2. Erro absoluto médio (MAE)

O erro absoluto médio (MAE) é a média da magnitude do erro, onde é dada a mesma importância a cada erro independentemente do sinal. Tal como o $RMSE$ o MAE é um bom indicador para comparação dos modelos e quanto menor o erro melhor o modelo. O MAE é calculado através da seguinte equação:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Viés_i| \quad [3.13]$$

Equação 3.13 - Cálculo do erro absoluto médio.

Onde, $Viés_i$ corresponde ao i -ésimo erro e n o número total de erros calculados.

3.2.3. Erro quadrático médio (MSE)

O erro quadrático médio (MSE) é um dos indicadores mais comuns e é um critério importante utilizado para a compreensão da precisão, exatidão e parcialidade de um modelo estatístico. O MSE é calculado através da seguinte equação:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Viés_i^2 \quad [3.14]$$

Equação 3.14 - Cálculo do erro quadrático médio

3.2.4. Raiz do erro quadrático médio (RMSE)

A raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) é um indicador que não é tanto quanto um indicador da previsão mas um bom indicador de comparação entre diferentes modelos estatísticos, quanto menor o erro melhor o modelo [51]. O $RMSE$ é calculado através da seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Viés_i^2} \quad [3.15]$$

Equação 3.15 - Cálculo da raiz do erro quadrático médio.

3.2.5. Erro absoluto médio normalizado (MAPE)

O erro absoluto médio normalizado (MAPE) é o valor médio do somatório das diferenças absolutas a dividir pelo valor observado. Este erro é independente da escala permitindo uma melhor compreensão da magnitude do erro. No entanto o MAPE quando os valores originais são muito pequenos torna-se instável [51]. O MAPE é calculado através da seguinte equação:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Viés_i}{X_i} \right| \quad [3.16]$$

Equação 3.16 - Cálculo do erro normalizado médio.

Onde, X_i corresponde ao i -ésimo valor observado.

3.2.6. Regressão Linear Simples

A análise de regressão linear é uma técnica utilizada vastamente em estatística onde se estuda a relação entre uma variável independente que tenta explicar uma variável dependente através de um modelo de regressão linear simples, Equação 3.17:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \quad [3.17]$$

Equação 3.17 - Modelo de regressão linear simples

Onde, y_i é a variável dependente, β_0 corresponde à intersecção da reta na origem, β_1 é o declive da reta, x corresponde à variável independente e ϵ_i é o erro aleatório ou estocástico onde se procura incluir as discrepâncias que não são explicadas linearmente segundo o modelo. Após obter a reta do modelo da regressão linear quantifica-se o grau da relação entre as duas variáveis através do coeficiente de correlação linear (coeficiente de determinação), r^2 .

O indicador estatístico r^2 é vastamente utilizado em modelos que visam prever ou testar hipóteses. Este serve como instrumento de medida de quão bem uma amostra se ajusta a uma regressão linear. Este pode ser calculado segundo a Equação 3.18.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{X})^2} \quad [3.18]$$

Equação 3.18 - Cálculo de r^2 .

Onde, f_i é o valor previsto segundo a regressão linear obtida. Portanto, no numerador da Equação 3.18 tem-se a soma do quadrado dos resíduos e no denominador a soma do total dos quadrados. Quanto mais perto de 1 estiver o valor de r^2 melhor o ajuste das amostras e melhor é o modelo.

O valor de r^2 pode compreender entre 0 e 1, onde para:

- $r^2 \cong 0$, significa que o modelo não explica a relação entre as duas variáveis;
- $r^2 = 1$, significa que o modelo explica a relação entre as duas variáveis na perfeição.

Portanto um valor de r^2 perto de 1 é desejado.

Inicialmente constrói-se o diagrama de dispersão com os dados para análise sobre a forma (x_i, y_i) e após efetua-se a regressão linear obtendo então a reta do modelo.

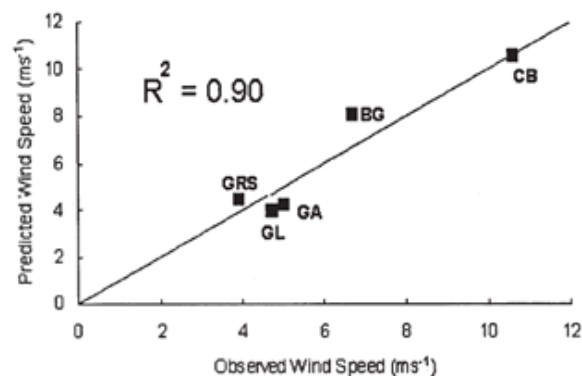


Figura 3.4. - Regressão linear simples à origem. Fonte: [52]

4. Metodologia Aplicada

O trabalho aqui apresentado baseia-se na metodologia multi-compósito desenvolvida pelo LNEG para a avaliação do recurso eólico, descrita em [9]. Esta em primeiro lugar gera uma grelha de recurso energético do vento por cada estação anemométrica disponível para a mesma área de estudo e com o mesmo espaçamento. Para tal recorre-se ao programa *WasP* (ou outro com ferramentas para este efeito). De seguida tem-se o cálculo da grelha de recurso final com a aplicação do método do inverso da distância. Ou seja, utilizando a distância de um ponto de interesse à estação anemométrica é atribuído um peso ao valor estimado com base no inverso da distância; quanto mais próximo da estação maior a influência dessa estação no ponto de interesse. A interpretação deste método é intuitiva pois assume-se que a influência do valor estimado diminui com o afastamento do ponto do interesse à estação anemométrica [53].

Tendo sido disponibilizados as séries de vento da campanha da Serra do Perdigão do projeto NEWA recorreu-se ao *WAsP* e ao *WindSim* para a obtenção das grelhas de recurso. São utilizados os dois programas de forma a poder comparar os resultados da aplicação do método do inverso da distância com grelhas de recurso provenientes de fontes diferentes. O *WindSim* já aplica este método no num dos seus módulos e dessa forma também foi comparado o compósito proveniente do *WindSim* com os compósitos obtidos através da aplicação do método do inverso da distância com a ferramenta desenvolvida.

A campanha do projeto NEWA continha cerca de cinquenta mastros meteorológicos, dos cinquenta foram selecionadas algumas estações com medições à mesma altura (~20 m), os critérios de seleção foi o maior número de observações meteorológicas à mesma altura com maior distribuição espacial de forma a ter uma boa representação do vento em vários locais diferentes. Através das séries de dados de vento das estações selecionadas foi efetuado um controlo de qualidade de informação, existiam falhas temporais nas series que foram tratadas neste momento.

Considerando esta metodologia multi-compósito, foi efetuada uma comparação do compósito final da grelha de recurso obtida de três formas diferentes para a região do caso de estudo 1 – Serra do Perdigão. O primeiro compósito foi obtido de acordo com a metodologia descrita em [9] mas para aplicação do método do inverso da distância foi utilizada a interface desenvolvida no âmbito desta dissertação. O segundo foi obtido através do programa *WindSim* onde foram gerados as diferentes grelhas de recurso do vento correspondentes a cada estação no estudo e depois passariam pelo mesmo processo na interface desenvolvida. O terceiro compósito também através do *WindSim* mas, como já referido anteriormente, o módulo “*Resources*” quando existe mais do que uma climatologia no projeto o programa *WindSim* cria uma grelha de recurso que é o resultado da aplicação do método do inverso da distância. A Figura 4.1 tem presente um fluxograma da metodologia aplicada.

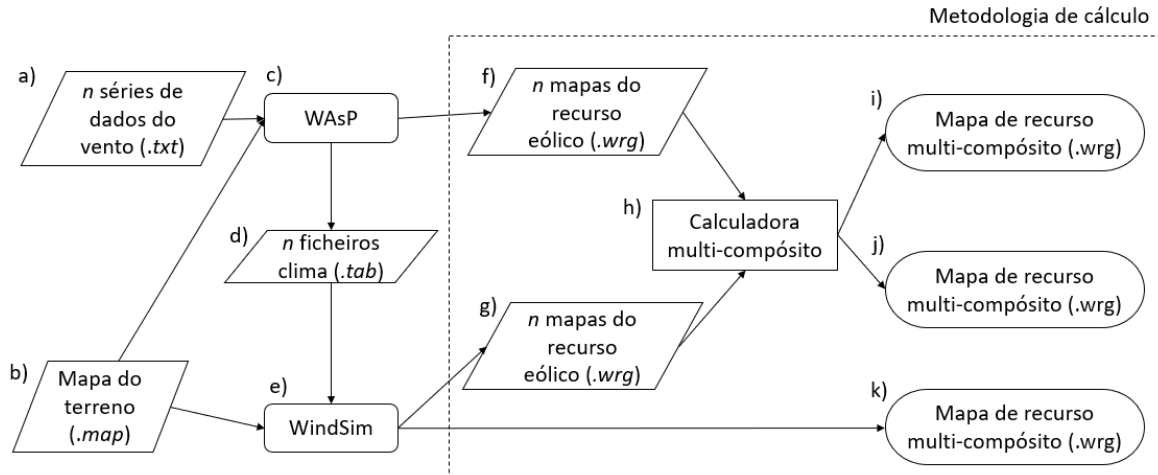


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia multi-compósito para obtenção de grelhas de recurso dos compósitos.

Considerando a Figura 4.1 existem três processos possíveis para obter os mapas de recurso multi-compósitos:

I. $a + b \rightarrow c \rightarrow f \rightarrow h \rightarrow i$

O ficheiro do mapa do terreno (.map) mais as n séries de dados do vento (.txt) foram inseridas no WAsP ($a + b \rightarrow c$), este gerou as grelhas de recurso (.wrg) das n estações anemométricas que foram então inseridas na interface obtendo assim a grelha de recurso do vento final ($f \rightarrow h \rightarrow i$).

II. $a \rightarrow c \rightarrow d + b \rightarrow e \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow j$

As n séries de vento são inseridas no WAsP de forma a obter os ficheiros de clima ($a \rightarrow c \rightarrow d$), após, juntamente com o ficheiro do terreno (.map) estes são inseridos no programa WindSim obtendo no final as grelhas de recurso (.wrg) das n estações anemométricas ($d + b \rightarrow e \rightarrow g$) que foram então inseridas na interface obtendo assim a grelha de recurso do vento final ($g \rightarrow h \rightarrow j$).

III. $a \rightarrow c \rightarrow d + b \rightarrow e \rightarrow k$

As n séries de vento são inseridas no WAsP de forma a obter os ficheiros de clima ($a \rightarrow c \rightarrow d$), após, juntamente com o ficheiro do terreno (.map) estes são inseridos no programa WindSim obtendo assim a grelha de recurso do vento final ($d + b \rightarrow e \rightarrow k$).

Resumidamente, estes foram os três processos de obtenção das grelhas de recurso do vento que são explicados de forma mais detalhada nos resultados.

4.1. Ferramenta desenvolvida

Para a aplicação do método do inverso da distância com distâncias diferentes desenvolveu-se um *Guide User Interface* (GUI) no *software Matlab* denominada *WRG Calculator 0.1* (Figura 4.2).

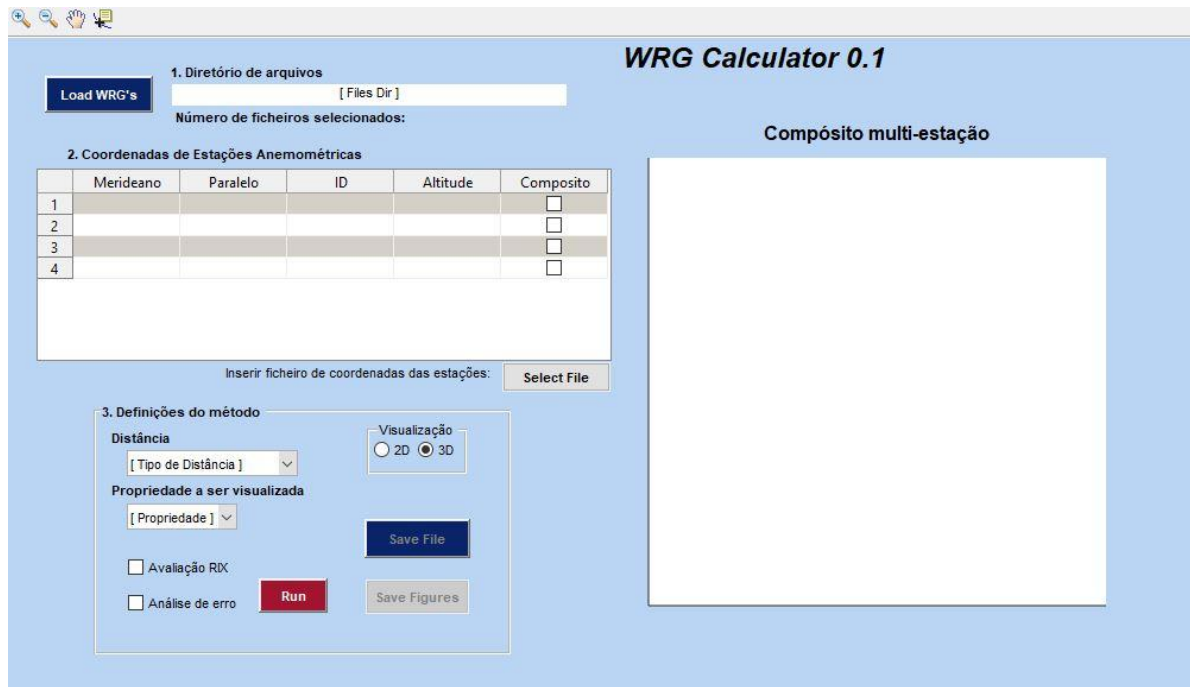


Figura 4.2 - Interface da ferramenta desenvolvida "WRG Calculator 0.1".

A ferramenta do WRG Calculator 0.1 recebe como input n ficheiros .wrg, as coordenadas das estações anemométricas onde as observações foram realizadas, a propriedade a ser visualizada e o tipo de distância a ser utilizado no método multi-estação. O output da ferramenta é um ficheiro .wrg único com o método aplicado e as imagens da propriedade escolhida. Também é possível utilizar a ferramenta para realizar uma análise de erro ou avaliação do RIX da estação anemométrica.

4.2. Parâmetros de estudo de terreno complexo

Na fase de estudo dos parâmetros de terreno complexo foram apenas foram utilizadas as grelhas de recurso obtidas através do programa WAsP.

Tomando cada ficheiro de mapa de recurso gerado é efetuado um estudo dos parâmetros distância absoluta entre as várias estações anemométricas e das características orográficas das mesmas. A distância absoluta é aplicada de acordo com o método do inverso da distância descrito em [9], sendo este parâmetro da máxima relevância. Esta pode ser calculada segundo a Equação 4.1.

$$D_i = \sqrt{(x_{est} - x_{obs})^2 + (y_{est} - y_{obs})^2} \quad [4.1]$$

Equação 4.1. – Cálculo da distância absoluta

Onde, D_i [m] corresponde à i -ésima distância entre cada par de estações anemométricas, x [m] e y [m] são o par de coordenadas correspondentes às coordenadas segundo o longitude e latitude, respetivamente. Por exemplo, a estação rne02 está localizada no par de coordenadas (x_{obs}, y_{obs}) e no respetivo mapa de recurso tem uma estimativa do valor da velocidade do vento para cada localização das outras estações anemométricas (x_{est}, y_{est}) , calculando a distância absoluta entre cada estação obtêm-se 11 distâncias D_i . Este procedimento é efetuado para cada uma das estações anemométricas.

A orografia como já discutido anteriormente tem um grande impacto no comportamento do vento, desta forma outro parâmetro interessante a analisar é a altitude, z , e a diferença de altitude, Δz , entre cada estação anemométrica. A diferença de altitude é calculada segundo a Equação 4.2.

$$\Delta z_i = z_{est} - z_{obs} \quad [4.2]$$

Equação 4.2. – Cálculo da diferença de altitude entre estações anemométricas.

Onde, Δz_i [m] corresponde á diferença de altitude para a i -éssima comparação entre estações, z_{est} [m] à altitude da estação anemométrica para qual foi estimada uma velocidade do vento e z_{obs} [m] corresponde à altitude da estação anemométrica que estima a velocidade do vento. Neste caso se $\Delta z_i > 0$, quer dizer que a estação anemométrica que é utilizada para estimar o valor em z_{obs} encontra-se a uma altitude inferior a z_{est} . Analogamente, $\Delta z_i < 0$ significa que a estimativa obtida é proveniente de uma estação anemométrica situada a uma altitude superior.

O indicador de complexidade RIX utiliza a orografia do terreno envolvente para caracterizar o quão complexo é o terreno e disponibilizar um indicador dos potenciais desvios que se irão obter nas estimativas. O ΔRIX é determinado com base na Equação 4.3 [54].

$$\Delta RIX = RIX_{est} - RIX_{obs} \quad [4.3]$$

Equação 4.3. – Cálculo do ΔRIX

Um valor negativo de ΔRIX significa que o RIX_{obs} do local de observação do vento é mais complexo do que o RIX_{est} do local estimado.

Com o aumento da altitude, normalmente, verifica-se um aumento da velocidade do vento, uma vez que à medida que a altitude aumenta, a fricção da superfície induz menor perturbação no escoamento e verifica-se uma diminuição da densidade do ar. Considerando esta relação que existe entre a velocidade e a altitude efetuou-se uma comparação as velocidades observadas entre cada estação, tendo em vista a sua instalação em diferentes altitudes. A diferença entre as velocidades de cada estação anemométrica foi determinada de acordo com a Equação 4.4.

$$\Delta v_i = v_{obs1} - v_{obs2} \quad [4.4]$$

Equação 4.4. – Cálculo da diferença de velocidades observadas

Onde Δv_i corresponde à i -éssima diferença de velocidade entre o par de estações, v_{obs1} e v_{obs2} correspondem ao par de velocidades observadas.

4.3. Metodologia de comparação de mapas de recurso

Inicialmente serão mapeados os mapas de recurso em análise com a ferramenta desenvolvida WRG Calculator obtendo um mapeamento como o que se apresenta na Figura 4.3.

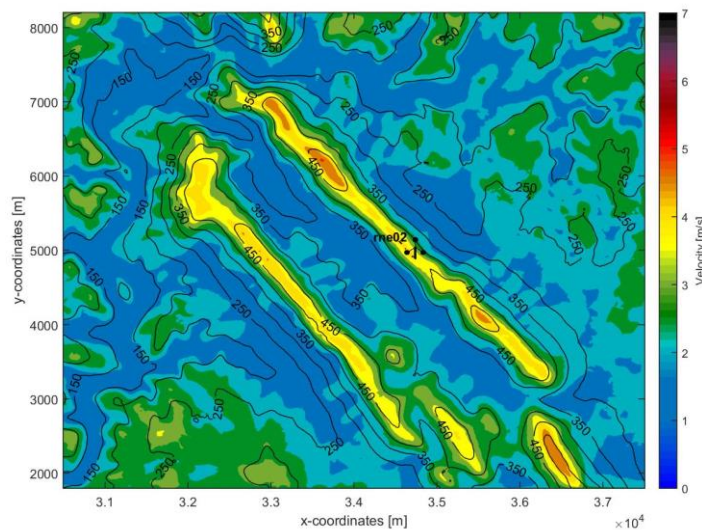


Figura 4.3. - Exemplo de mapeamento do recurso eólico pela ferramenta desenvolvida.

A figura tem presente a orografia com a indicação da altitude na isolinha, em x e y correspondentes à longitude e latitude das coordenadas do sistema ETRS89, finalmente as cores no mapa correspondem

à velocidade estimada do mapa de recurso obtido onde a barra de cores à esquerda indica a velocidade estimada em m/s e está compreendida entre os 0 m/s e os 7 m/s.

De seguida é analisado erro individual de cada mapa de recurso obtido. É preenchida uma tabela do género da Tabela 4.1.

Tabela 4.1. - Exemplo de tabela de análise de erro individual de um mapa de recurso obtido.

Estação/Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
	Estação 1	v1	v2	e1	e2	e3 %
Estação/Compósito	Estação 2	v3	v4	e4	e5	e6 %

Na coluna “Estação/Compósito” está o nome da estação, do compósito ou conjunto de estações utilizadas na elaboração de um compósito. Na coluna da “Localização” encontram-se os nomes da estação com a qual se está a comparar o valor estimado com o valor observado. Através do nome e com auxílio da tabela com as localizações de cada estação é possível obter a localização pormenorizada da mesma. Também com auxílio à imagem do mapeamento do recurso é possível verificar a localização visual da estação em questão. Na coluna da “Velocidade observada” encontram-se as velocidades médias observadas durante a campanha do caso de estudo. Na coluna “Velocidade estimada” encontram-se uma estimativa da velocidade do vento para a estação em questão presentes no mapa de recurso da mesma. Na coluna do “Viés” é apresentado o valor do viés calculado segundo a Equação 3.12 com $n=1$. Na coluna “Erro Quadrático” é apresentado o valor do erro quadrático calculado segundo a Equação 3.14 com $n=1$. Na coluna “Erro Normalizado” é apresentado o valor do erro normalizado calculado segundo a Equação 3.16 com $n=1$.

No caso de análise de um compósito o erro é também analisado em termos médios resumindo o desempenho geral do mapa de recurso em questão. É preenchida uma tabela do género da Tabela 4.2.

Tabela 4.2. - Exemplo de tabela de análise de erro de um mapa de recurso gerado a partir de um compósito.

Compósito	Viés Médio [m/s]	Erro Absoluto Médio [m/s]	Erro Quadrático Médio [m/s]	Raiz do Erro Quadrático Médio [m/s]	Erro Médio Normalizado
Compósito 1	e1	e2	e3	e4	e5 %
Compósito 2	e6	e7	e8	e9	e10 %
...

Na coluna “Compósito” está o nome do compósito ou conjunto de estações utilizadas na elaboração de um compósito. Na coluna do “Viés Médio” é apresentado o valor do viés médio calculado segundo a Equação 3.12. Na coluna do “Erro Absoluto Médio” é apresentado o valor do erro absoluto médio calculado segundo a Equação 3.13. Na coluna “Erro Quadrático Médio” é apresentado o valor do erro quadrático segundo a Equação 3.14. Na coluna do “Raiz do Erro Quadrático Médio” é apresentado o valor do raiz do erro quadrático médio calculado segundo a Equação 3.15. Na coluna “Erro Normalizado” é apresentado o valor do erro normalizado médio calculado segundo a Equação 3.16. Nesta análise as estações utilizadas para obter o compósito não são tidas em conta, pelo que, o valor do número das amostras, n , presente nas equações referidas varia dependendo do compósito.

Após a análise da tabela de compósitos é efetuada a análise da regressão linear simples na origem. Para aplicar a análise de regressão linear é necessário, previamente, tomar algumas decisões e compreender sobre o caso de estudo em si, o que é esperado do modelo. Neste caso, o objetivo da regressão linear é avaliar o modelo utilizado para estimar a velocidade do vento comparando os resultados com observações reais, portanto é esperado que para uma velocidade observada igual a 0 m/s

a estimada seja 0 m/s. Desta forma na análise do modelo linear considerou-se a reta a passar na origem, portanto o parâmetro β_0 será igual a 0 m/s em todas as análises efetuadas. É obtida de exemplo a Figura 4.4.

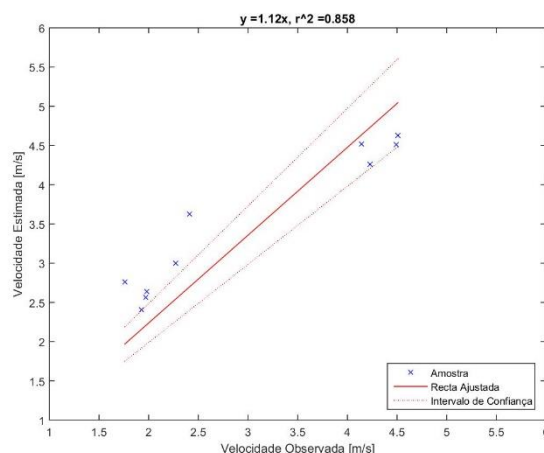


Figura 4.4. – Exemplo de uma regressão linear simples à origem.

Na figura pode-se observar no eixo horizontal a velocidade observada em metros por segundo (variável independente) e no eixo vertical a velocidade estimada também em metros por segundo (variável dependente). As cruzes azuis correspondem ao par da amostra (velocidade observada, velocidade estimada), a reta vermelha à reta ajustada de regressão linear, as retas picotadas ao intervalo de confiança e no título da figura encontram-se os parâmetros da regressão linear que estarão resumidos numa tabela do género da Tabela 4.3.

Tabela 4.3. - Exemplo de tabela de parâmetros do modelo linear da comparação dos valores estimados por um mapa de recurso e os valores observados.

Estação/Compósito	Modelo Linear: $y = \beta_0^a + \beta_1 x$	
	β_1	r^2
Estação/Compósito 1	b1	r1
Estação/Compósito 2	b2	r2
...
^a é sempre igual a zero visto que o modelo linear forçou a intersecção em (0,0).		

Na coluna “Estação/Compósito” está o nome da estação, do compósito ou conjunto de estações utilizadas na elaboração de um compósito. Na coluna do “ β_1 ” os valores de declive da reta que é esperado que seja perto de um tendo em conta que as variáveis em questão referem-se ao mesmo evento. Na coluna “ r^2 ” são apresentados os valores do coeficiente de correlação calculados segundo a Equação 3.18, idealmente o valor também deverá apresentar um valor próximo de 1 resumindo-se numa boa correlação de dados.

4.4. Distâncias analisadas

4.4.1. Distância Euclidiana

A distância Euclidiana ou cartesiana é a distância entre dois pontos no espaço euclidiano. Podemos definir a distância matematicamente com o teorema de Pitágoras para n dimensões, para os pontos $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ e $B(b_1, b_2, \dots, b_n)$ a distância Euclidiana entre os pontos AB é definida por:

$$\overline{AB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad [4.5]$$

Equação 4.5 - Distância Euclidiana a n dimensões.

Nesta dissertação, apenas foram utilizadas a duas e três dimensões.

4.4.2. Distância Manhattan

A distância de Manhattan, também conhecida por geometria do táxi, métrica L_1 , em que a distância entre dois pontos numa grelha plana é definida como a soma das diferenças absolutas das coordenadas. Se temos os pontos $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ e $B(b_1, b_2, \dots, b_n)$ a distância Manhattan entre A e B é definida por:

$$\overline{AB} = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i| \quad [4.6]$$

Equação 4.6 - Distância Manhattan.

4.4.3. Distância Minkowsky

A distância Minkowsky é uma métrica num vetor espaço normalizado que pode ser uma generalização dos casos da distância Euclidiana e Manhattan. Considerando os pontos $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ e $B(b_1, b_2, \dots, b_n)$ a distância Minkowsky entre A e B é definida por:

$$\overline{AB} = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad [4.7]$$

Equação 4.7 - Distância Minkowsky.

4.4.4. Distância Chebyshev

A distância Chebyshev também conhecida como métrica máxima, distância de xadrez ou métrica L_∞ é uma métrica definida em que distância entre dois vetores corresponde à diferença máxima ao longo de cada dimensão. Esta pode ser definida através do limite da Equação 4.7:

$$\overline{AB} = \lim_{p \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad [4.8]$$

Equação 4.8 - Distância de Chebyshev

Por isso esta distância ser conhecida como métrica L_∞ .

4.5. Comparação das diferentes distâncias e número de estações anemométricas a utilizar na criação do compósito

O método do inverso da distância usado como referência neste trabalho, recorre à distância Euclidiana para o cálculo do peso a atribuir a cada estação. Achou-se pertinente utilizar diferentes métricas e diferentes números de estações de forma a verificar qual o melhor procedimento na utilização do método de compósito. Com as cinco estações anemométricas utilizadas para criar os compósitos descritos nos vários processos da metodologia de compósito foram criados cinco compósitos com combinações de estações diferentes para cada métrica. Os ficheiros (.wrg) utilizados para a elaboração do estudo das métricas foram os ficheiros provenientes do *WAsP*. A ferramenta desenvolvida no âmbito desta dissertação permite a aplicação das diferentes métricas dependendo da escolha do utilizador. As restantes seis estações anemométricas foram utilizadas para validação e comparação dos vários compósitos criados.

4.6. Parâmetro RIX

Como já referido anteriormente o parâmetro RIX é utilizado como indicador da complexidade do terreno. Desta forma decidiu-se incorporar o cálculo deste parâmetro na ferramenta desenvolvida. Não existindo uma formulação exata para o cálculo do RIX disponível tentou-se replicar através da descrição e da visualização no programa *WAsP*. Formularam-se os seguintes parâmetros:

- Raio (R) – este raio determina a área a considerar para o cálculo do RIX;
- Número de sectores (s) – este parâmetro define a divisão da circunferência em sectores;
- Número de subsectores (ss) – este define a divisão de cada sector;
- Declive crítico (θ_c) – este declive é o critério a considerar no cálculo do RIX.

O parâmetro RIX existe no programa *WAsP* como base para a avaliação da previsão dos erros que surgem em terrenos complexos, sendo introduzido em 1996 pelos académicos da Universidade Técnica de Dinamarca (DTU). Em 2006 Mortensen et al. mostraram quais os melhores critérios “gerais” para serem utilizados no cálculo do RIX [55]. Embora seja possível mudar os critérios Mortensen sugere a utilização dos valores por defeito do *WAsP*, sendo estes valores os seguintes:

- $R = 3500 \text{ m}$;
- $\theta_c = 0.3 \text{ rad}$;
- $s = 12$;
- $ss = 6$.

Em 2008 é efetuada a validação do indicador de desempenho RIX [56].

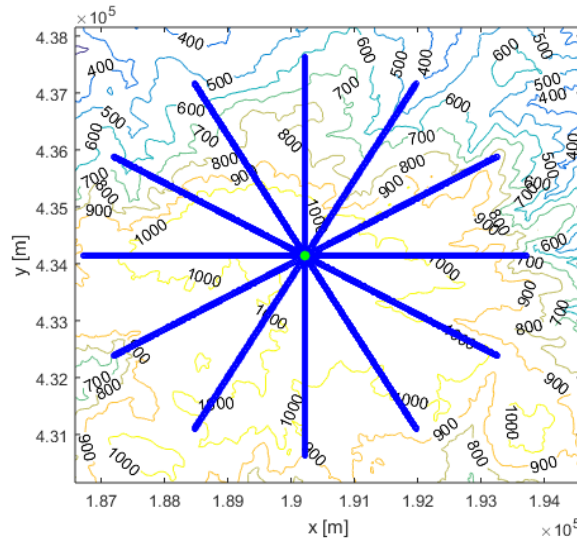


Figura 4.5 - Exemplo de $s \times ss$ direções para $s=12$ e $ss=1$.

Através destes juntamente com a orografia local é possível fazer o cálculo do RIX. Portanto, tendo em conta o ponto do interesse traçam-se $s \times ss$ número de direções como exemplificado na Figura 4.5 (linhas azuis). Cada “direção a analisar” contém R/dx número de pontos, onde dx corresponde ao passo da grelha de recurso. De seguida, é atribuída a cada ponto uma altitude referente à topografia do local, de seguida é calculado declive entre cada ponto consecutivo. O declive é comparado a θ_c segundo a Equação 4.9.

$$\begin{cases} 1. n_{\alpha,i} = 1, & \text{se } \tan((h_{\alpha,i} - h_{\alpha,i+1})/dx) > \theta_c \\ & \text{ou} \\ 2. n_{\alpha,i} = 0, & \text{se } \tan((h_{\alpha,i} - h_{\alpha,i+1})/dx) < \theta_c \end{cases} \quad [4.9]$$

Equação 4.9. – Sistema de equação condicional em função do declive.

Onde $n_{\alpha,i}$ corresponde a um valor lógico de 1 ou 0 para cada ponto i , da direção α , e $h_{\alpha,i}$ corresponde à altitude do ponto. A tangente calculada corresponde à ao declive entre as duas altitudes dx de distância entre si (Figura 4.6). Pela Equação 4.9 é atribuído um valor lógico correspondente a cada declive calculado mediante o sistema condicional apresentado na mesma.

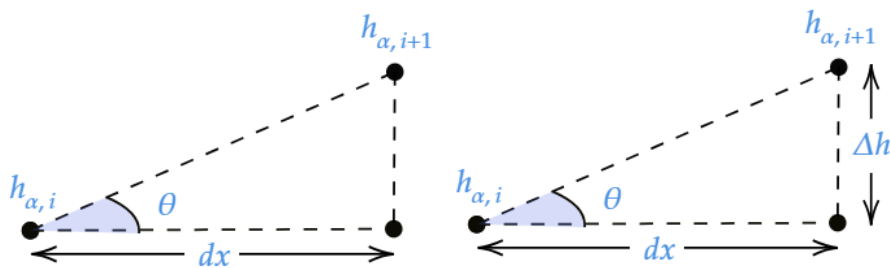


Figura 4.6. - Esquema do cálculo do declive.

Finalmente, segundo a Equação 4.10 somou-se as ocorrências onde o declive é superior a θ_c e dividiu-se pelo total de declives calculados ao longo das várias direções.

$$RIX = \frac{\sum_{i=1}^n n_{\alpha,i}}{n} \quad [4.10]$$

Equação 4.10. - Cálculo do indicador de complexidade de terreno RIX.

De forma a validar o método apresentado os valores de RIX obtidos são comparados com os valores calculados pelo *WAsP* na secção dos resultados.

A representação do RIX na ferramenta desenvolvida tem dois modos de visualização, em três (Figura 4.7.-a)) ou duas (Figura 4.7.-b) dimensões.

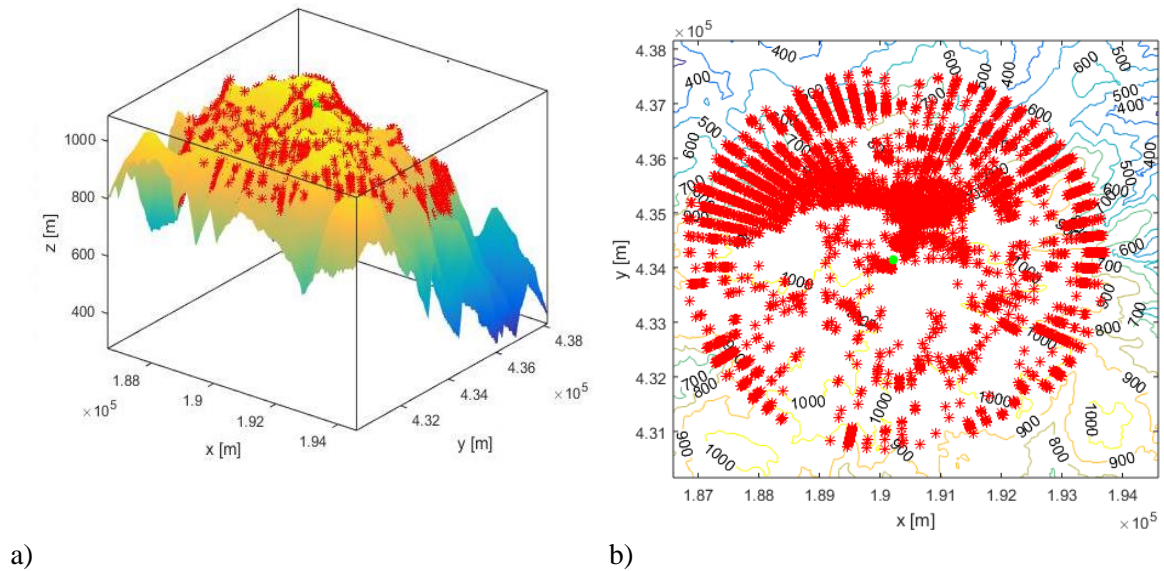


Figura 4.7. – A vermelho encontram-se os declives superiores a θ_c para a mesma área de estudo. Visualização em a) três dimensões ou em b) duas dimensões.

5. Resultados da Aplicação da metodologia desenvolvida

5.1. Caso de estudo 1 - Serra do Perdigão

5.1.1. Tratamento de dados

Os dados disponibilizados para este caso de estudo aplicado à Serra do Perdigão foram obtidos através de uma campanha experimental de medição do vento realizada no âmbito do projeto New European Wind Atlas (NEWA). Foram disponibilizadas séries temporais de dados de vento (velocidade e direção do vento) de várias estações anemométricas [57, 58].

Na Figura 5.1 apresenta-se a localização de todas as estações anemométricas da campanha experimental da Serra do Perdigão. Estas foram selecionadas, pelo maior número de estações anemométricas com observações à mesma altura e com maior dispersão espacial, correspondendo a 11 estações anemométricas a 20 m de altura. Das 11 estações selecionadas, 5 eram mastros de 20 m de altura (Figura 5.1 assinaladas a verde na figura) e as restantes 6 até 60 m de altura (Figura 5.1 assinaladas a laranja na figura).

A Tabela 5.1 apresenta a lista das estações anemométricas e a sua localização, organizada por ordem crescente de altura da estação e latitude.

Tabela 5.1 - Dados e identificação das estações anemométricas na serra do Perdigão

Nome da estação	Cota [m]	Altura da estação [m]	ETRS89		WGS84	
			Longitude [m]	Latitude [m]	Longitude [°]	Latitude [°]
tnw01	302	20	32611.28	4623.17	7°45'10.17"W	39°42'33.39"N
tse08	337	20	33977.69	4634.04	7°44'12.80"W	39°42'33.55"N
rne02	444	20	34737.46	4877.19	7°43'40.86"W	39°42'41.32"N
rne07	457	20	33886.57	5852.00	7°44'16.40"W	39°43'13.05"N
rsw07	470	20	32822.82	5000.93	7°45'01.22"W	39°42'45.61"N
rsw03	460	60	33569.86	4006.84	7°44'30.04"W	39°42'13.27"N
tse06	385	60	33636.59	4487.36	7°44'27.15"W	39°42'28.84"N
rsw06	470	60	33087.97	4686.07	7°44'50.14"W	39°42'35.36"N
tse11	359	60	34334.33	4973.22	7°43'57.77"W	39°42'44.50"N
tnw07	300	60	33587.18	5351.36	7°44'29.07"W	39°42'56.86"N
tnw10	415	60	33952.07	5628.10	7°44'13.70"W	39°43'05.78"N

Cada estação registou os dados com um desfasamento de 5 min com início a 25 de Abril de 2017 e terminando a 16 de Junho de 2017, correspondente a 1 mês e 3 semanas. No entanto, devido a algumas descontinuidades na série temporal de algumas estações apenas foi possível ter uma disponibilidade de 89,86% dos dados registados (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Disponibilidade da série temporal de dados.

Número de registos por estação anemométrica	14218
Número de registos utilizados	12776
Número de registos não utilizados	1442
Disponibilidade	89,86 %

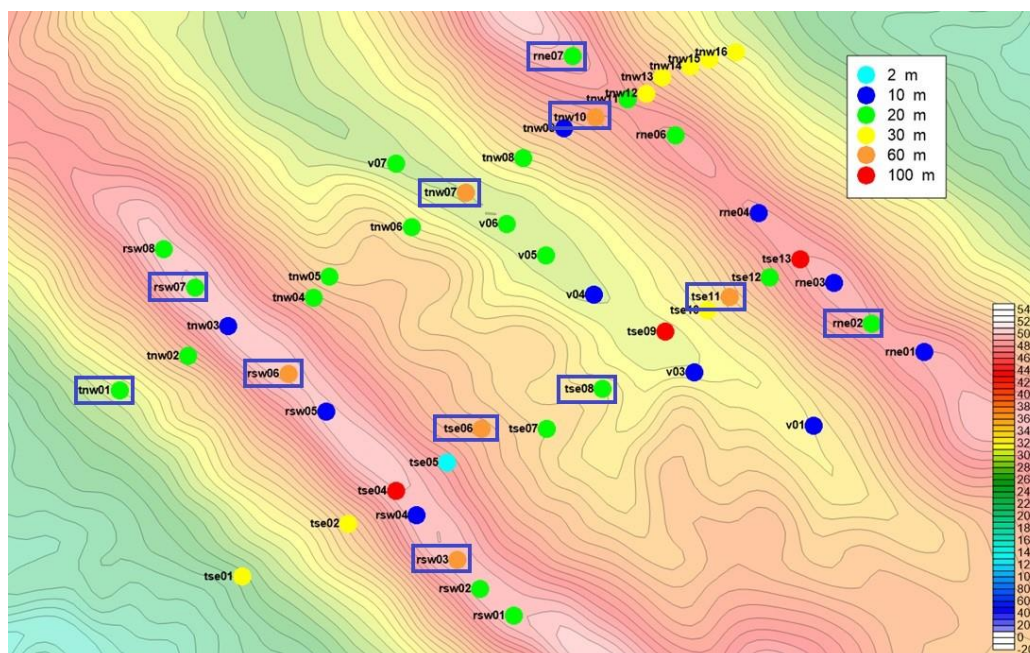
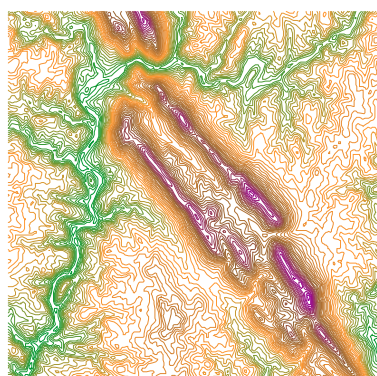


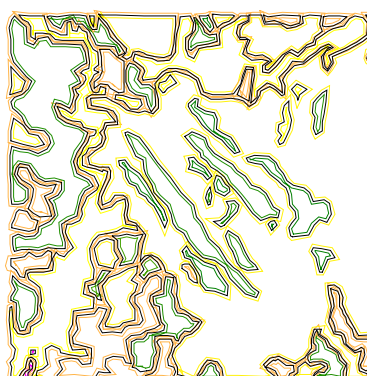
Figura 5.1. - Mapa topográfico da área de estudo do Perdigão (legenda no canto inferior direito). Estações coloridas por classes de acordo com a altura das estações anemométricas (legenda no canto superior direito). As estações anemométricas utilizadas na metodologia aplicada estão realçadas com um retângulo azul. Fonte: LNEG

Os dados são contínuos no tempo, no entanto, existem falhas temporais com ausência de dados de vento em vários momentos. A razão destas falhas é desconhecida, mas supôs-se que fosse devido a falhas aleatórias da rede de transmissão de dados das estações para um aparelho onde eram concentrados todos os dados da experiência do perdigão. Dado que para o desenvolvimento deste trabalho era determinante que todas as estações anemométricas contivessem o mesmo período de dados, sempre que uma série de dados continha uma falha, este período era descartado em todas as outras.

Também foi disponibilizado o mapa do terreno e rugosidade do Perdigão em formato compatível com WAsP e projetados no sistema ETRS89 (Figura 5.2). O mapa de rugosidade foi desenhado manualmente com base em fotos e cartografia do local obtendo assim a Figura 5.2 - b. Este mapa de rugosidade juntamente com o mapa de isolinhas foram utilizados para todas as simulações efetuadas.



a)



b)

Figura 5.2 - Mapeamento do Perdigão a) mapa isolinhas; b) mapa de rugosidade.

5.1.2. Análise de dados

Analisando os viés obtido para cada estimativa de cada uma das estações, construiu-se a Tabela 5.4. A título de exemplo, na Tabela 5.3 encontra-se o viés da estimativa proveniente pela estação tse11 para cada um dos pontos observados, a Tabela 5.4 utilizada a coluna do viés para criar uma linha.

Tabela 5.3 – Tabela de análise de erro individual para a estação tse11.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse11	rne02	3.96	2.621	-1.339	1.794	33.82%
	rne07	4.14	2.913	-1.227	1.506	29.64%
	rsw03	4.23	2.753	-1.477	2.182	34.92%
	rsw06	4.49	2.913	-1.577	2.487	35.12%
	rsw07	4.51	2.989	-1.521	2.314	33.73%
	tnw01	1.97	1.663	-0.307	0.094	15.56%
	tnw07	1.93	1.559	-0.371	0.138	19.22%
	tnw10	2.41	2.333	-0.077	0.006	3.18%
	tse06	2.27	1.927	-0.343	0.117	15.10%
	tse08	1.98	1.709	-0.271	0.073	13.68%
	tse11	1.76	1.794	0.034	0.001	1.96%

Na Tabela 5.4 os nomes das estações na vertical correspondem á estação que fez a estimativa do valor da velocidade, ao seja analisando os valores horizontalmente para a estação tse11 verificam-se os viés registados na tabela anterior, os nomes na horizontal representam os locais onde foram efetuadas as observações e a tabela está organizada de forma descendente em altitude. Cada entrada da tabela apresenta um tom de vermelho, azul ou branco, dependendo do valor do viés – para o valor de viés positivo até um máximo de 2 m/s a entrada tem a cor vermelha; para o valor de viés negativo até um mínimo de -2 m/s a entrada tem a cor azul; finalmente, quando o valor de viés se aproxima de 0 m/s a entrada apresenta uma cor mais clara ou branca. Na quinta linha, por exemplo, para a estação anemométrica tnw07 estimou-se uma velocidade média para a localização da estação tnw10 com um viés de 1.63 m/s correspondendo ao viés mais elevado e por sua vez ao tom de vermelho mais acentuado da Tabela 5.4. Nas entradas da tabela onde se encontram ‘-’ seria a estimativa para o mesmo local de observação e portanto foram omissos da tabela.

Tabela 5.4 – Análise de Viés de todas as estações em estudo da serra do Perdigão. Cada entrada apresenta um tom de vermelho, azul ou branco, dependendo do valor do viés: 0 m/s <viés ≤ 2 m/s - cor vermelha; -2 m/s ≤ viés < 0 m/s - cor azul; viés ≈ 0 m/s cor mais clara ou branca.

Viés		Valor Estimados [m/s]										Erro médio	
		rsw06	rsw07	rsw03	rne07	rne02	tnw10	tse06	tse11	tse08	tnw01	tnw07	absoluto [m/s]
Estações Anemométricas	rsw06	-	0.15	0.10	0.38	0.15	1.20	0.56	0.81	0.46	0.39	0.19	0.44
	rsw07	-0.02	-	0.04	0.30	0.09	1.14	0.49	0.74	0.39	0.32	0.13	0.37
	rsw03	0.03	0.13	-	0.36	0.13	1.18	0.51	0.76	0.39	0.33	0.15	0.40
	rne07	-0.24	-0.16	-0.20	-	-0.11	0.98	0.40	0.66	0.34	0.25	0.05	0.34
	rne02	0.02	0.12	0.03	0.38	-	1.22	0.73	1.00	0.66	0.59	0.48	0.52
	tnw10	-1.41	-1.34	-1.32	-1.04	-1.20	-	-0.15	0.21	-0.12	-0.12	-0.12	0.70
	tse06	-0.91	-0.85	-0.84	-0.57	-0.72	0.45	-	0.31	0.00	-0.05	-0.21	0.49
	tse11	-1.58	-1.52	-1.48	-1.23	-1.34	-0.08	-0.34	-	-0.27	-0.31	-0.37	0.85
	tse08	-0.92	-0.86	-0.84	-0.56	-0.76	0.45	0.12	0.43	-	0.08	0.04	0.50
	tnw01	-0.34	-0.25	-0.24	-0.03	-0.21	0.87	0.20	0.47	0.13	-	-0.16	0.29
	tnw07	0.63	0.73	0.68	0.91	0.71	1.63	0.75	0.95	0.61	0.48	-	0.81
Erro médio absoluto [m/s]		0.61	0.61	0.58	0.58	0.54	0.92	0.43	0.63	0.34	0.29	0.19	

Analisando a Tabela 5.4, observa-se que para a localização da estação *tnw10* a estimativa da velocidade média calculada pelas restantes estações obtêm os maiores viés perfazendo uma média de 0.92 m/s, resultando no maior erro médio absoluto. Relativamente ao erro médio absoluto das velocidades do vento estimadas por cada uma das estações anemométricas, verifica-se que os mapas gerados pelas estações *tnw10*, *tse11* e *tnw07* obtêm os resultados menos satisfatórios na estimação do recurso eólico com erros médios absolutos de 0.70, 0.85 e 0.81 m/s, respetivamente. Pelas cores presentes na tabela verifica-se uma divisão clara com uma diferença de tom da cor da entrada entre *rne02* e *tnw10*, criando quatro quadrantes com a linha entre *rne02* e *tnw01* como divisor tanto na horizontal como na vertical. O primeiro quadrante corresponde às entradas à esquerda e acima de *tnw01*, o segundo quadrante às entradas à direita de *rne02* e acima de *tnw01*, o terceiro quadrante às entradas à esquerda de *tnw01* e abaixo de *rne02*, e o quarto quadrante às entradas à direita e abaixo de *rne02*. O primeiro quadrante apresenta tons mais suaves de ambas as cores indicando um viés mais perto de 0 m/s, o segundo quadrante apresenta vários tons de vermelhos correspondentes a viés entre 0.05 e 1.22 m/s, o terceiro quadrante apresenta maioritariamente entradas de tons azuis com valores de viés entre -1.58 a 0.91 m/s, finalmente no quarto quadrante verifica-se uma maioria de tons suaves, no entanto também se verificam algumas entradas de tons de vermelhos mais acentuados.

Através destas observações da Tabela 5.4 achou-se pertinente verificar se existe tendência para:

- viés positivo quando o valor estimado é proveniente de uma estação que se encontra a uma altitude superior á do ponto de interesse;
- viés negativo quando o valor estimado é proveniente de uma estação que se encontra a uma altitude inferior á do ponto de interesse;
- viés aproximadamente 0 m/s quando o valor estimado é proveniente de uma estação em condições semelhantes;

Antes de verificar os pontos referidos anteriormente decidiu-se analisar o efeito da distância na estimativa do recurso do vento uma vez que é aplicado o método do inverso na metodologia presente para análise de terrenos complexos. Pelo uso deste método é implícito que a influência de cada ponto da grelha de recurso reduz com a distância entre este e a estação anemométrica tal como indicado em [48]. Com os valores do viés presentes na Tabela 5.4 e a distância absoluta calculada segundo a Equação 4.1 criou-se um gráfico de dispersão obtendo assim a Figura 5.3.

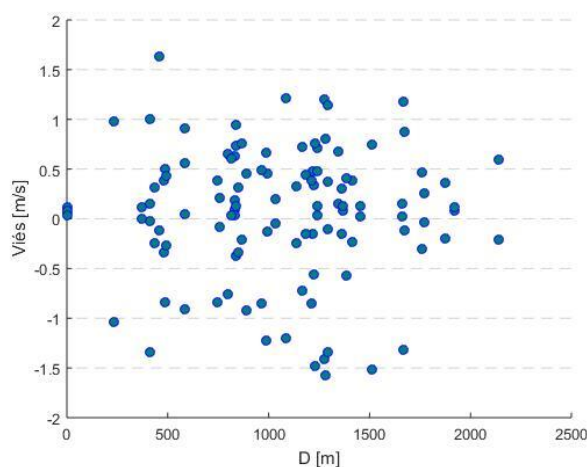


Figura 5.3 – Gráfico de dispersão do viés ao longo de *D* para as estações anemométricas da serra do Perdigão.

Da análise da Figura 5.3 observa-se que o viés não é dependente de *D*, se fosse dependente estaria-se à espera que à medida que *D* aumenta o viés fosse cada vez maior. No entanto, observa-se que o

viés tem uma distribuição aleatória, mantendo-se entre os -2 m/s e os 2 m/s ao longo do eixo dos Δz 's, não mostrando quaisquer sinais de dependência pela distância D .

Atendendo às observações tiradas a partir da Tabela 5.4 decidiu-se começar por analisar o impacto da altitude, Δz , segundo a Equação 4.2 com o viés obtido através de um gráfico de dispersão obtendo assim a Figura 5.4.

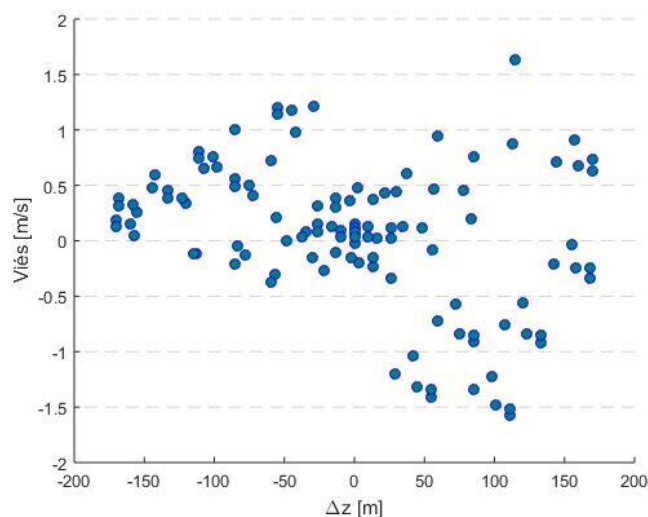


Figura 5.4. – Gráfico de dispersão do viés com Δz para as estações anemométricas da serra do Perdigão.

Analisando a Figura 5.4 pode-se verificar que para um $\Delta z \approx 0 \text{ m}$ e $\text{viés} \approx 0 \text{ m/s}$ existe uma concentração, ao seja quando a altitude da estação anemométrica é semelhante à altitude do ponto de interesse o viés é perto de 0 m/s. À medida que Δz aumenta deixa-se de verificar qualquer precisão ou exatidão na relação de Δz com o viés, a amostra para um $\Delta z > 0 \text{ m}$ demonstra uma grande dispersão de viés. Por outro lado, para $\Delta z < 0 \text{ m}$ verifica-se uma menor dispersão dos viés obtidos e, maioritariamente, os viés obtidos são positivos, $\text{viés} > 0 \text{ m/s}$.

Considerando novamente a altitude decidiu-se traçar um gráfico com três variáveis: altitude do local do valor estimado (z), viés e diferença de altitude (Δz). Obteve-se assim a Figura 5.5, nesta figura procedeu-se ao à aplicação do convexo de Hull² com base as duas variáveis do viés e da altitude. A aplicação do conceito do convexo de Hull permite obter o limite do viés para uma dada altitude entre a altitude mínima e máxima. Analisando a Figura 5.5, verifica-se que para as altitudes menores o viés tende a ser menor, ao seja quando a estimativa é proveniente de uma estação anemométrica que se encontra a uma altitude superior o desvio tende a ser menor, por outro lado, quando a estimativa é proveniente por uma estação anemométrica a uma altitude inferior o viés tende a ser maior. O convexo de Hull, representado a azul na figura, ajuda a demonstrar que com o aumento de altitude o viés aumenta, ao seja com o aumento da altitude, maior o número de $\Delta z > 0 \text{ m}$ logo as estimativas obtidas são provenientes de estações a uma altitude inferior que por sua vez demonstram maiores valores de viés. Também se observa que quando $\Delta z \approx 0 \text{ m}$, amostras com a cor verde, o viés é geralmente menor.

Tendo em conta estas observações decidiu-se fazer uma análise de diagrama de caixa do viés para as estimativas efetuadas para cada localização das estações anemométricas. A análise de diagrama

² Dado um conjunto de pontos num espaço, o convexo de hull consiste em encontrar o menor número de pontos que gerem um polígono convexo no qual abranja todos os outros pontos.

de caixa para cada uma das estações está presente na Figura 5.6, o eixo dos xx's está organizado por altitude crescente do local da estimativa.

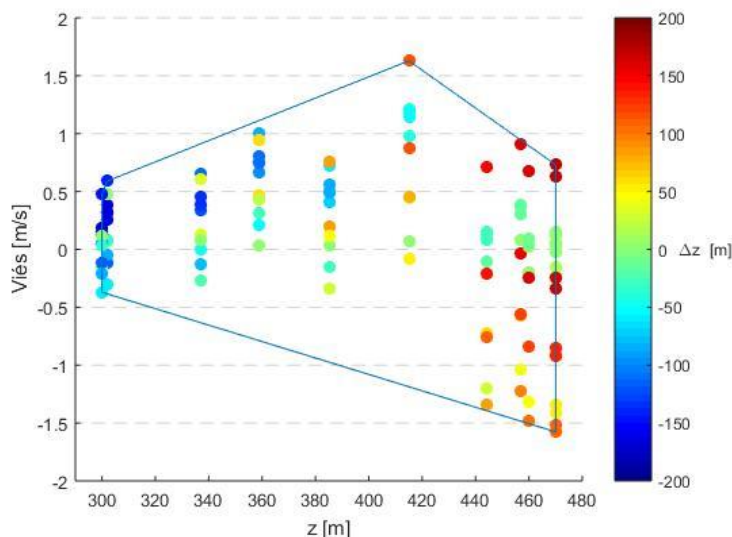


Figura 5.5. – Gráfico de dispersão do viés obtido para cada estimativa efetuada para cada altitude com barra de cor correspondente à diferença de altitude para o caso de estudo da serra do Perdigão. Linha azul envolvente do dataset corresponde ao convexo de hull.

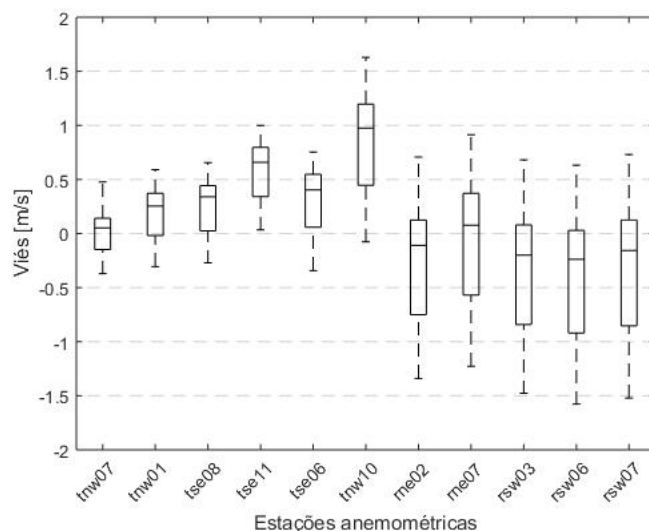


Figura 5.6. – Diagrama de caixa do viés por estação anemométrica para o caso de estudo da serra do Perdigão.

A Figura 5.6 permite compreender a distribuição do viés da amostra. Analisando as caixas tnw01, tse08, tse11, tse06 e tse10 verifica-se que o 3º quartil, ao seja mais de 75% das amostras, estão acima da linha do $viés = 0 \text{ m/s}$. Excecionalmente a estação tnw07 tem pouco mais de 50% das amostras com valores de viés positivos. Nos restantes diagramas de caixas verificou-se que as restantes estações, que se encontram a altitudes superiores, têm significativamente mais de 50% das amostras com $viés$ negativo com exceção da estação rne07 que têm a mediana da caixa acima da linha de $viés$ igual a 0 m/s . Parece também existir uma tendência para a amplitude do diagrama de caixa ser maior nas estações com altitudes superiores, dessa forma decidiu-se calcular a amplitude de cada diagrama de caixa segundo a Equação 5.1.

$$A_{viés} = \max(viés(h)) - \min(viés(h)) \quad [5.1]$$

Equação 5.1. – Cálculo da amplitude do diagrama de caixa.

Onde $A_{viés}$ é a amplitude dos viés para cada estação anemométrica, $viés(h)$ é conjunto de viés para cada e altura h , $\max()$ e $\min()$ são funções para encontrar o máximo e mínimo de cada conjunto, respetivamente. Após este cálculo traçou-se a Figura 5.7.

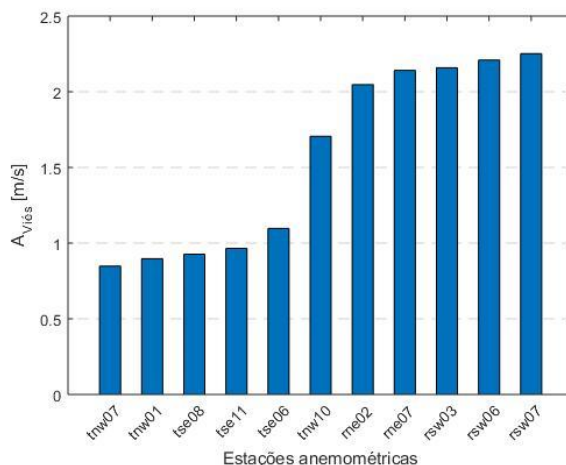


Figura 5.7. – Diagrama de barras da amplitude para cada estação anemométrica para o caso de estudo da serra do Perdigão.

Analisando a figura verificou-se que de com o aumento de altitude a amplitude do viés aumenta, no entanto o que se destacou da figura foi o grupo das primeiras cinco estações anemométricas que tem uma amplitude de ± 1 m/s e o grupo das últimas cinco estações têm uma amplitude um pouco maior que 2 m/s. Apenas a estação tnw10 é que mostra uma amplitude intermédia. O que distingue estes grupos é que o primeiro grupo são estações que se encontram na encosta da montanha a altitudes dos 300 m aos 385 m, o segundo grupo são estações que se encontram no topo de cumeadas com altitudes dos 444 m aos 470 m. A estação tnw10 encontra-se na encosta da montanha aos 410 m de altitude, o valor intermédio da amplitude pode-se dever ao facto da estação se encontrar a poucos metros da cumeadas.

Com o aumento da altitude, normalmente, verifica-se um aumento da velocidade do vento, desta forma procede-se a análise da velocidade do vento observado com o aumento da altitude. Em primeiro lugar calculou-se a diferença de velocidades Δv , segundo a Equação 4.4, de seguida traçou-se um novamente um gráfico de dispersão obtendo a Figura 5.8. Na figura observa-se o gráfico de dispersão do viés com Δv e uma barra de cor com o Δz respetivo.

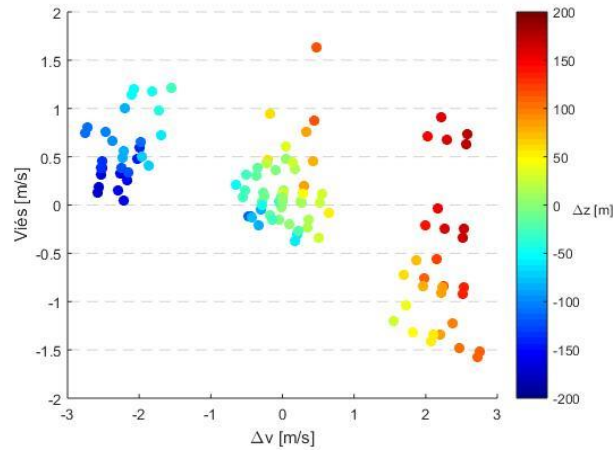


Figura 5.8. – Gráfico de dispersão do viés com a diferença de velocidades, Δv , e barra de cor com a diferença de altitude, Δz para o caso de estudo da serra do Perdigão.

Analisando a Figura 5.8, pode-se observar 3 conjuntos com as seguintes características:

1. Centro em $\Delta v \cong -2$ [m/s], onde, $\Delta z < 0$ m e $1.5 \geq \text{viés} \geq 0$ [m/s]
2. Centro em $\Delta v \cong 0$ [m/s], onde, $-0.5 \geq \text{viés} \leq 1.8$ [m/s] ;
3. Centro em $\Delta v \cong 2$ [m/s], onde, $\Delta z > 0$ m e $-1.6 > \text{viés} \geq 1$ [m/s];

Através do 1º conjunto descrito anteriormente verifica-se que para um Δz negativo e Δv negativo o viés tende a ser positivo não ultrapassando ± 1.25 m/s. Através do 2º conjunto verifica-se que para um Δv próximo de 0 m o viés também tende a ser próximo de 0 m/s. Através do 3º conjunto verifica-se que, tendencialmente, para um Δz positivo obtém-se um viés negativo com valores de viés inferiores a 0 m/s, no entanto existem exceções o que mostra que para estimativas provenientes de estações que se encontram a altitudes inferiores do ponto de interesse existe maior incerteza.

Portanto, regra geral verifica-se que para um Δz negativo obtém-se um Δv negativo como esperado, devido ao referido anteriormente do aumento da velocidade com a altitude, por outro lado para um Δz positivo, tendencialmente, obtém-se um Δv positivo.

Na Figura 5.8 verificou-se que a diferença de velocidade observada e a diferença de altitude têm um impacto significativo no viés. Desta forma, decidiu-se criar o perfil diário da velocidade do vento das várias estações anemométricas para analisar o seu comportamento típico ao longo de um dia. De forma a criar o perfil diário da velocidade do vento para cada estação, foi calculada a média de 5 em 5 minutos das 0h às 24h. A média foi calculada com os valores registados na série de dados de vento de cada estação. Desta forma criou-se a Figura 5.9 com o perfil diário de cada estação.

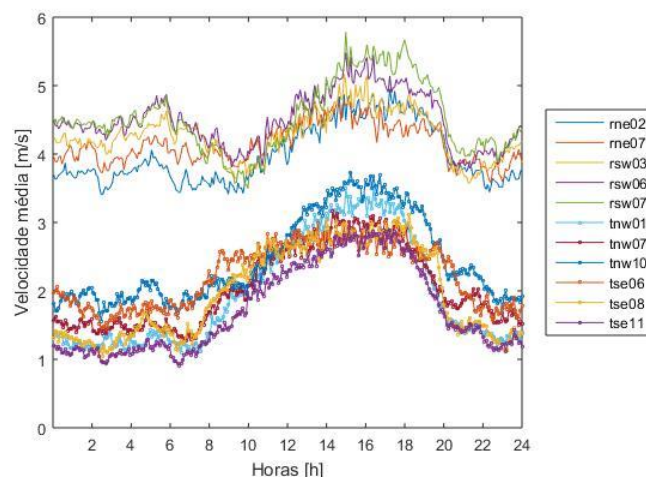


Figura 5.9. - Perfil diário serra do Perdigão para anemómetro a 20 m de altura.

Analisando a Figura 5.9 a primeiro instante verifica-se dois grupos de perfis diários distintos separados por ± 2 m/s de diferença de velocidades médias ao longo do dia. O primeiro grupo é composto pelos perfis diários das estações rne02, rne07, rsw03, rsw07 e rsw06, todas estas são estações que se encontram no topo da cumeeira. O segundo grupo composto pelas restantes estações correspondem às estações que se encontram na encosta da montanha, apenas a tnw07 que se encontra no vale da dupla cumeeira. Portanto, claramente existe um regime de vento diferente entre as estações na encosta ou no topo da montanha. Analisando os perfis diários das estações na encosta, verifica-se uma aceleração por volta das 6h da manhã até cerca das 15h. Esta aceleração deve-se ao efeito do aquecimento da superfície da montanha que cria correntes de vento com sentido para o topo da montanha, a este efeito dá-se o nome de ventos anabáticos. Após as 15h da tarde, durante um período de ± 2 h a velocidade mantém-se, de seguida, às 18h verifica-se uma redução da velocidade média do vento até às 24h aparentando manter a velocidade média até às 6h do dia seguinte iniciando o novo ciclo. A redução da velocidade do vento verificada a partir das 18h da tarde deve-se à diminuição das temperaturas no topo da montanha produz vento no sentido contrário do anabático, a este efeito contrário chama-se de vento catabático. Analisando agora os perfis diários da velocidade do vento registados pelas estações anemométricas no topo da montanha, verifica-se um comportamento um pouco diferente das estações anemométricas da encosta. Em primeiro lugar apenas começa a ser visível o efeito dos ventos anabáticos a partir das ± 10 h da manhã, após o qual verifica-se um aumento da velocidade do vento por um período de 5h até às 15h onde, tal como a velocidade do vento da encosta, esta começa a decrescer devido aos ventos catabáticos. Este decréscimo, no entanto, parece ocorrer a uma taxa superior, estabilizando aproximadamente às 20h. A velocidade do vento, das 20h às 3h do dia seguinte, perfazendo 7h no total, mantém-se a velocidades semelhantes não existindo variações significativas. Cerca das 3h da manhã, embora subtil, pode-se observar uma diminuição da velocidade, de seguida um aumento até aproximadamente às 6h da manhã onde novamente volta a diminuir até às 10h, e assim começa novamente o ciclo descrito.

O indicador de performance ΔRIX é utilizado como indicador de desempenho de uma estação anemométrica e dessa forma é calculado segundo a Equação 4.3. Para o cálculo do RIX utilizou-se a ferramenta desenvolvida obtendo os seguintes valores de RIX, Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores de RIX para cada estação anemométrica da Serra do Perdigão.

Estação	rne02	rne07	rsw03	rsw06	rsw07	tnw01	tnw07	tnw10	tse06	tse08	tse11
RIX (%)	9.52	12.55	10.21	12.85	14.86	12.76	13.28	10.67	11.46	10.79	10.42

A partir da tabela anterior é então calculado o ΔRIX entre todas as estações, Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Valores de ΔRIX entre todas as estações anemométricas da Serra do Perdigão.

ΔRIX (%)	rne02	rne07	rsw03	rsw06	rsw07	tnw01	tnw07	tnw10	tse06	tse08	tse11
rne02	-	3.03	0.69	3.33	5.34	3.24	3.76	1.15	1.94	1.27	0.90
rne07	-3.03	-	-2.34	0.30	2.31	0.21	0.73	-1.88	-1.09	-1.76	-2.13
rsw03	-0.69	2.34	-	2.64	4.65	2.55	3.07	0.46	1.25	0.58	0.21
rsw06	-3.33	-0.30	-2.64	-	2.01	-0.09	0.43	-2.18	-1.39	-2.06	-2.43
rsw07	-5.34	-2.31	-4.65	-2.01	-	-2.10	-1.58	-4.19	-3.40	-4.07	-4.44
tnw01	-3.24	-0.21	-2.55	0.09	2.10	-	0.52	-2.09	-1.30	-1.97	-2.34
tnw07	-3.76	-0.73	-3.07	-0.43	1.58	-0.52	-	-2.61	-1.82	-2.49	-2.86
tnw10	-1.15	1.88	-0.46	2.18	4.19	2.09	2.61	-	0.79	0.12	-0.25
tse06	-1.94	1.09	-1.25	1.39	3.40	1.30	1.82	-0.79	-	-0.67	-1.04
tse08	-1.27	1.76	-0.58	2.06	4.07	1.97	2.49	-0.12	0.67	-	-0.37
tse11	-0.90	2.13	-0.21	2.43	4.44	2.34	2.86	0.25	1.04	0.37	-

Para comparar os valores de ΔRIX com o Viés calculado anteriormente criou-se a Figura 5.10. Analisando a figura é difícil de retirar conclusões sobre a tendência de ocorrer separação de fluxo como indicando em [36]. Isto poderá ser pela Serra do perdigão ser um caso de estudo específico onde vários fenómenos meteorológicos ocorrem em simultâneo.

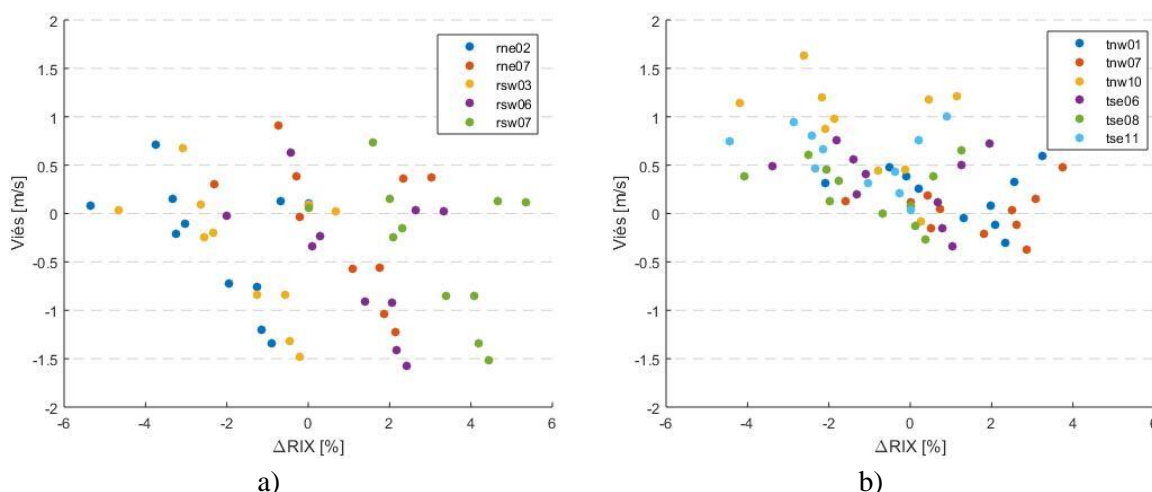


Figura 5.10 – Gráfico de dispersão do indicador de desempenho ΔRIX com o viés para as estações anemométricas da Serra do Perdigão.

5.1.3. Processo de obtenção das grelhas de vento multi-compósito

Tendo em conta a análise anterior escolheram-se cinco estações para proceder à criação de uma grelha de recurso única utilizando a metodologia multi-estação da ferramenta desenvolvida e a metodologia do *WindSim*. Foram escolhidas três estações que se encontram no topo da cumeada e duas estações da encosta, as cinco estações selecionadas foram rne07, rsw07, rsw06, tse06 e tse08. As restantes seis estações foram utilizadas para validação e comparação dos vários processos.

Foram criados dois compósitos com a aplicação da metodologia na ferramenta desenvolvida e um compósito da metodologia do *WindSim*. Um dos compósitos obtido através da metodologia da ferramenta é proveniente das malhas de recurso obtidas através do *WAsP* e outro através das grelhas de recurso provenientes do *WindSim*.

5.1.3.1. Processo I

Iniciou-se um projeto *WAsP* onde se inseriu o ficheiro do terreno (.map) com as características da topografia e da rugosidade. De seguida, inseriu-se uma grelha de recurso e um atlas do vento para inserir os dados meteorológicos observados. Posteriormente, inseriu-se a altura do anemómetro, a série de velocidade e direção do vento. Com este primeiro passo é gerada uma rosa dos ventos e o diagrama de *Weibull* presentes na Figura 5.11, visando caracterizar o vento local através de informação estatística.

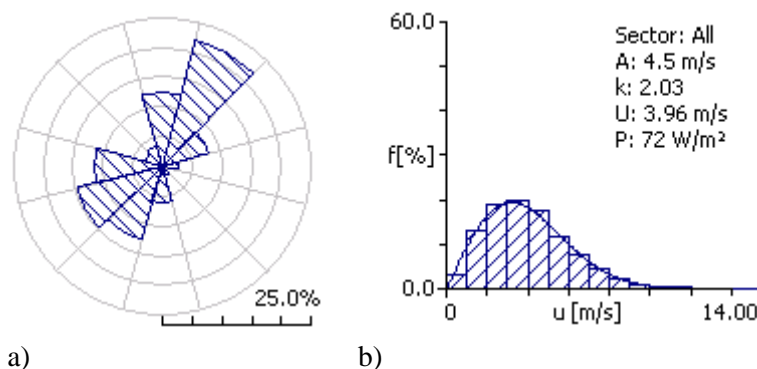


Figura 5.11 – Dados estatísticos da estação anemométrica rne02. a) Rosa-dos-ventos; b) diagrama de Weibull.

De seguida colocou-se as coordenadas da estação no programa e os parâmetros da grelha. Devido aos limites definidos para a área de interesse e à resolução de 10 m para a grelha de recurso obtêm-se um total de 325141 nodos na grelha de recurso final.

Posteriormente, iniciou-se a simulação obtendo a grelha de recurso. Foram repetidos estes passos para cada uma das estações anemométricas antes de seguir para o próximo passo.

Os dados das cinco estações seleccionadas são então inseridas na ferramenta desenvolvida obtendo-se finalmente a grelha de recurso final – daqui em diante denominada como *WAsPMultiComp*.

5.1.3.2. Processo II

Neste processo são obtidos os ficheiros da grelha de recurso para cada estação anemométrica através da aplicação do modelo *WindSim*. Para tal, inicialmente foi necessário criar os ficheiros clima³ (.tab) de cada estação provenientes do *WAsP*.

Properties	
1: Terrain extension	
Coordinate system	Global
X-range	30490; 37510
Y-range	1790; 8210
2: Roughness	
Roughness height	Read from grid.gws
3: Numerical model	
Automatic gridding	False
Refinement type	No refinement
Height above terrain	2500
Maximum number of cells	10000000
Height distribution factor	0.05
Orthogonalize 3D grid	True
Number of cells in Z direction	21
4: Smoothing	
Smoothing type	WindSim smoothing
Terrain smoothing limit	0.01
Radial weighting	0
5: Forest	
Forest	Disregard forest

Figura 5.12 - Propriedades do módulo "Terrain" do *Windsim* inseridas para simulação do terreno.

³ Ficheiros com informação sobre a velocidade média do vento, rosa de ventos, parâmetros da distribuição de Weibull e Fluxo de potência incidente.

O primeiro passo no *WindSim* foi inserir o mapa do terreno e rugosidade. De seguida foi definida a área de interesse, a altura de rugosidade, o modelo numérico, o tipo de alisamento a considerar no terreno entre outras informações como se apresenta na .

No campo do modelo numérico foram efetuados os cálculos necessários para simular a área de interesse com a mesma resolução de 10 m. Efetuou-se alisamento ao terreno para facilitar (ou mesmo permitir) a convergência no módulo “*Wind Fields*”. A área de interesse simulada e o mapa de rugosidade obtidos encontram-se representados na Figura 5.13.

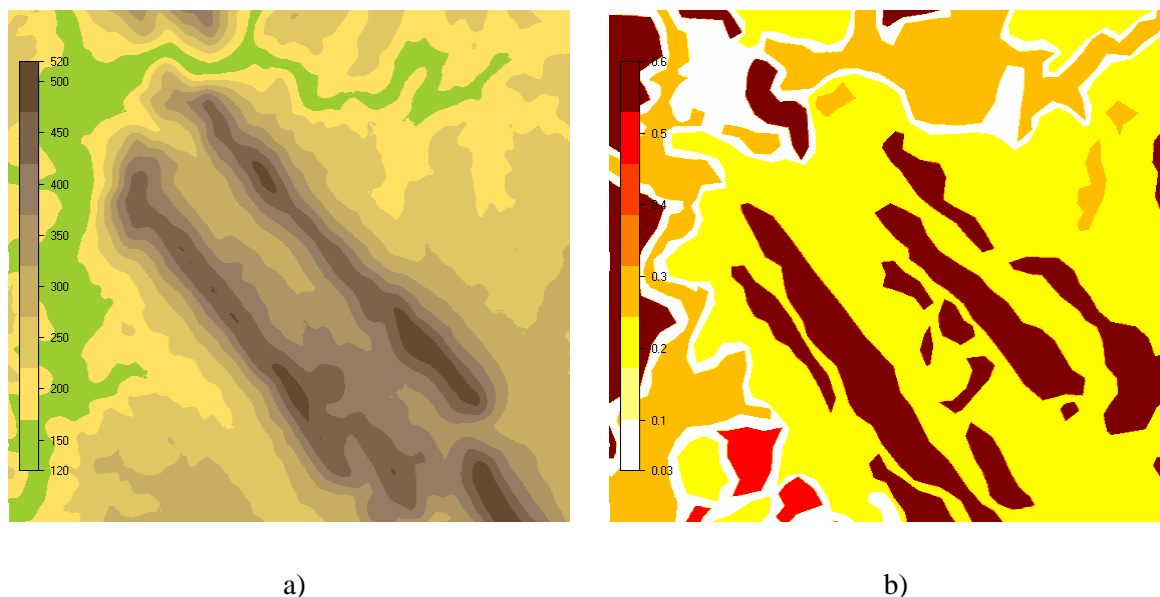


Figura 5.13 – Representação do modelo digital do terreno da sua a) elevação e da sua b) rugosidade

De seguida foi necessário correr o módulo do “*Wind Fields*”, sendo este o passo mais moroso e computacionalmente mais dispendioso com este modelo. Os parâmetros inseridos nas propriedades deste módulo encontram-se na Tabela 5.7. A Tabela 5.8 apresenta o tempo de simulação, número de iterações e estado de convergência por sector.

Tabela 5.7 - Propriedades do módulo “*Wind Fields*” do *Windsim* inseridas para simulação numérica das equações de Navier-Stokes. Fonte: Relatório de simulação *WindSim*.

Altura da camada limite (m)	500
Velocidade por cima da camada limite (m/s)	10
Condição limite superior	Pressão Constante
Temperatura Potencial	Não
Modelo de turbulência	<i>Standard</i>
Solução	GCV
Número de iterações máximo	350

Tabela 5.8 - Tempo de simulação, número de iterações e o estado de convergência por sector (C: convergência). Fonte: Relatório de simulação do WindSim.

Sector [°]	Tempo de simulação	Número de Iterações	Estado	Sector [°]	Tempo de simulação [h]	Número de Iterações	Estado
000	11:13:56	245	C	180	09:48:31	223	C
030	08:37:39	196	C	210	10:02:36	228	C
060	08:36:53	195	C	240	11:13:01	254	C
090	15:45:40	350	-	270	15:40:09	350	-
090	03:15:31	71	C	270	02:01:14	43	C
120	09:56:29	218	C	300	10:03:36	228	C
150	07:20:24	159	C	330	07:13:53	159	C

Verifica-se pela Tabela 5.8 que os sectores 90° e 270° aparecem repetidos, isto acontece pois após as 350 iterações ainda não tinham chegado a convergência. Desta forma foi necessário correr o módulo outra vez, mas apenas para os sectores onde não houve convergência.

Depois do módulo “*Wind Fields*” é executado o módulo “*Objects*”. Neste módulo o programa utilizou os ficheiros clima (.tab) extraídos no primeiro passo para calibrar os cálculos de energia efetuados no módulo anterior. Finalmente foi no módulo “*Wind Resource*” que se obteve os ficheiros da grelha de recurso do vento em formato *WAsP* para cada estação (.wrg).

Após simulação e obtenção das grelhas de recurso com o *WindSim* foram selecionadas as mesmas cinco estações para inserir na calculadora de compósitos obtendo a grelha de recurso final – daqui em diante denominada como *WindsimMultiComp*. As restantes seis estações anemométricas foram utilizadas para validação e comparação dos vários processos.

5.1.3.3. Processo III

Este processo é semelhante ao anterior com a diferença que no módulo “*Objects*” apenas foram inseridas as cinco climatologias utilizadas para fazer o compósito nos processos anteriores. O *WindSim* no módulo “*Wind Fields*” já efetua automaticamente o método do inverso da distância criando uma grelha de recurso com todas as climatologias em simulação – daqui em diante denominada como *WindsimComp*.

5.1.4. Método de compósito

Após os três processos descritos nos capítulos anteriores foram obtidos três compósitos diferentes constituídos pelas cinco estações anemométricas rsw06, rsw07, rne07, tse08 e tse11. Através dos ficheiros de recurso eólico obtidos estes foram mapeados. Os ficheiros *WAsPMultiComp* e *WindSimMultiComp* foram mapeados com a ferramenta desenvolvida, Figura 5.14 a) e b) respetivamente, e o *WindSimComp* foi mapeado pelo programa *WindSim*, Figura 5.14 c).

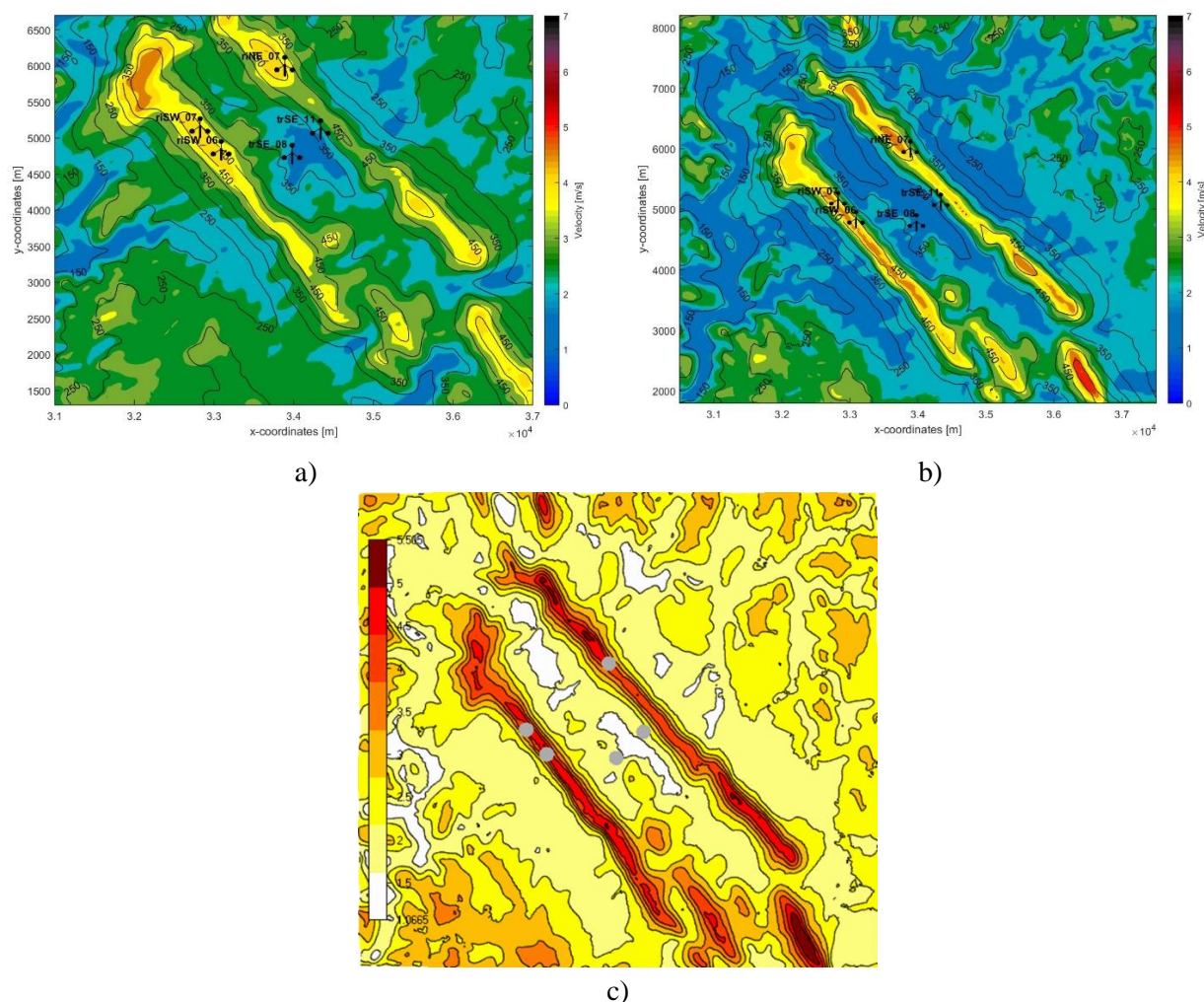


Figura 5.14. - Mapeamento do compósito a) WAsPMultiComp; b) WindSimMultiComp; c) WindSimComp. Em c) a escala do WindSim está entre ~1 e ~5,5 m/s onde cada cor representa uma diferença de 0,5 m/s.

As restantes observações das outras seis estações anemométricas foram utilizadas para validação e comparação dos três processos descritos anteriormente. Através dos ficheiros de recurso dos três compósitos foram identificadas as velocidades do vento estimadas para cada estação seleccionada para validação e foram calculadas várias métricas de avaliação de erro segundo o capítulo 3.2. Nomeadamente, o viés segundo a Equação 3.12, o erro médio absoluto segundo a Equação 3.14, o erro quadrático médio calculado segundo a Equação 3.15, a raiz do erro quadrático médio calculado segundo a Equação 3.13 e o erro médio absoluto normalizado segundo a Equação 3.16. Os resultados das métricas de avaliação estão sumarizadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9. - Comparação de resultados dos compósitos criados.

Compósito	Viés Médio [m/s]	Erro Absoluto Médio [m/s]	Erro Quadrático Médio [m^2/s^2]	Raiz do Erro Quadrático Médio [m/s]	Erro Normalizado
WAsPMultiComp	0.169	0.692	0.495	0.703	26.68%
WindSimMultiComp	-0.025	0.225	0.081	0.284	9.38%
WindSimComp	0.307	0.417	0.290	0.538	14.33%
rne07	0.198	0.339	0.186	0.432	14.47%

De seguida, fez-se um estudo de regressão linear simples da velocidade observada com a velocidade estimada obtendo assim a Figura 5.15. Na figura tem-se no eixo dos xx's a velocidade observada e no eixo dos yy's a velocidade estimada, os pontos a azul representam o par de velocidades, a reta vermelha corresponde à regressão linear e a linha tracejada ao intervalo de confiança. Os parâmetros da regressão linear encontram-se na Figura 5.15, onde β_0 e β_1 correspondem aos parâmetros da reta e r^2 ao coeficiente de regressão. O coeficiente de regressão foi calculado segundo a Equação 3.18.

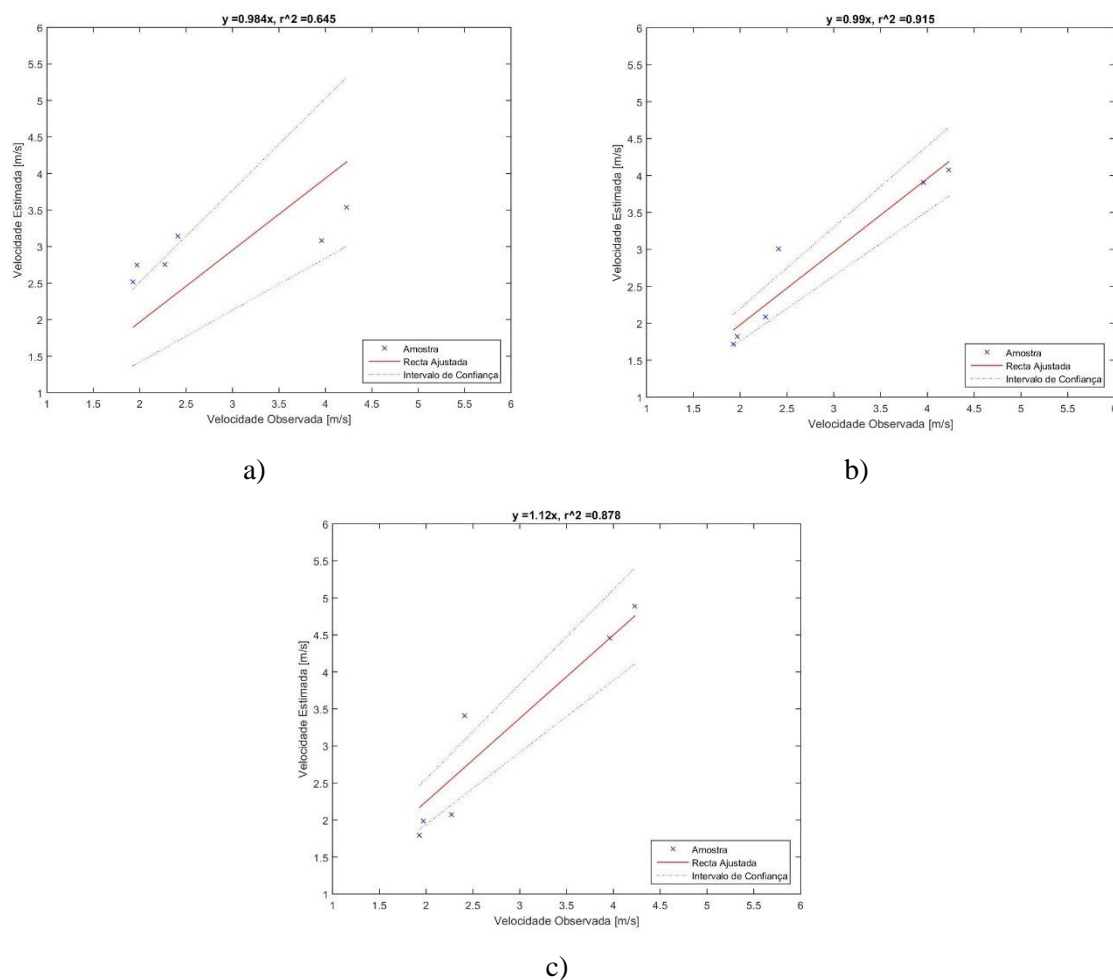


Figura 5.15. - Estudo da regressão linear da velocidade estimada pela velocidade observada com o compósito: a) WASPMultiComp; b) WindSimMultiComp; c) WindSimComp.

Tabela 5.10. – Parâmetros da regressão linear dos vários compósitos.

Compósito	Modelo Linear: $y = \beta_0^a + \beta_1 x$	
	β_1	r^2
WASPMultiComp	0.984	0.645
WindSimMultiComp	0.990	0.915
WindSimComp	1.124	0.878

^a é sempre igual a zero visto que o modelo linear forçou a intersecção

Idealmente, na Tabela 5.10 esperar-se-ia β_1 igual a 1, pois isto indicaria que a velocidade estimada era igual à velocidade observada. Analisando a Figura 5.15 a reta que mais se assemelha a este comportamento é o compósito *WindSimMultiComp* com o parâmetro β_1 mais próximo de 1. O coeficiente de regressão também é o mais elevado indicando que é a reta em que os pontos mais se

ajustam à mesma. Este compósito obteve os melhores resultados em todos os campos calculados, o menor *MAE*, *MSE*, *RMSE* e *MAPE*, também obteve o melhor ajuste dos valores estimados em relação aos observados. Portanto o método de compósito do *WindSim* obteve os segundos melhores resultados e o *WAsP MultiComp* foi o compósito com resultados menos satisfatórios. Na Tabela 5.9 também se encontra a estação rsw07 que é a estação de input com menor erro absoluto médio, comparando o compósito WindSimMultiComp à melhor estação anemométrica de “input” verifica-se uma diminuição dos vários erros, com especial atenção ao erro absoluto médio.

5.1.5. Comparação de diferentes distâncias para o método multi-compósito

Utilizando as diferentes distâncias são gerados três compósitos com auxílio da ferramenta desenvolvida. Os compósitos são compostos pelos ficheiros de recurso do vento obtidos através do programa *WAsP* e são utilizadas diferentes combinações de estações. Os compósitos estão definidos segundo a Tabela 5.11.

Tabela 5.11. – Estações utilizadas para cada compósito

Compósito	Estações
Compósito 1	tse08 tse11
Compósito 2	rsw06 rsw07 rne07
Compósito 3	tse08 tse11 rsw06 rsw07 rne07

Foram gerados os mapas de recurso de cada compósito com a respetiva distância (presentes no Anexo C.1, Anexo C.2 e Anexo C.3), calculados os erros médios (Tabela 5.12) e aplicou-se o modelo linear de forma a analisar o ajustamento dos resultados obtidos, calculados segundo as equações referidas durante o capítulo 3.2.

Tabela 5.12. – Erros médios dos mapas de recurso gerados pela *WRG Calculator* presentes no Anexo C com *WRG*’s obtidos através do programa *WAsP* para todas as distâncias discutidas no capítulo 1.1.

Distância utilizada	Compósito	Viés Médio [m/s]	Erro Absoluto Médio [m/s]	Erro Quadrático Médio [m/s]	Raiz do Erro Quadrático Médio [m/s]	Erro Médio Normalizado
Minkowsky p=0,5	Compósito 1	-0.704	0.737	0.119	0.345	19.44%
Minkowsky p=1,5	Compósito 1	-0.718	0.736	0.101	0.318	19.44%
Euclidiana	Compósito 1	-0.721	0.737	0.099	0.314	19.47%
Euclidiana 3D	Compósito 1	-0.722	0.738	0.099	0.315	19.49%
Manhattan	Compósito 1	-0.714	0.738	0.107	0.328	19.49%
Minkowsky p=4	Compósito 1	-0.726	0.739	0.097	0.311	19.50%
Chebyshev	Compósito 1	-0.728	0.739	0.095	0.309	19.50%
Minkowsky p=0,5	Compósito 3	0.167	0.674	0.557	0.746	26.01%
Euclidiana 3D	Compósito 3	0.168	0.687	0.582	0.763	26.48%
Manhattan	Compósito 3	0.171	0.688	0.582	0.763	26.54%
Minkowsky p=1,5	Compósito 3	0.171	0.691	0.589	0.767	26.66%
Euclidiana	Compósito 3	0.169	0.692	0.591	0.769	26.68%
Minkowsky p=4	Compósito 3	0.170	0.692	0.592	0.769	26.72%
Chebyshev	Compósito 3	0.172	0.693	0.594	0.771	26.80%
Minkowsky p=4	Compósito 2	0.819	0.915	0.792	0.890	44.17%
Euclidiana	Compósito 2	0.822	0.916	0.794	0.891	44.24%
Chebyshev	Compósito 2	0.819	0.917	0.796	0.892	44.25%
Euclidiana 3D	Compósito 2	0.822	0.916	0.794	0.891	44.25%

Manhattan	Compósito 2	0.824	0.916	0.793	0.891	44.27%
Minkowsky p=1,5	Compósito 2	0.823	0.916	0.795	0.892	44.29%
Minkowsky p=0,5	Compósito 2	0.828	0.917	0.792	0.890	44.32%

A Tabela 5.12 encontra-se organizada de forma ascendente pelo erro médio normalizado. Os valores dos erros apresentados não aparentam variar substancialmente com a distância utilizada, mas sim dependendo dos compósitos. O compósito gerado com duas estações, tse08 e tse11, é o compósito com resultados mais consistentes onde pelo viés médio juntamente com o erro absoluto médio verifica-se que as estimativas do recurso eólico tendem a ser subavaliadas e o erro quadrático médio e a raiz do erro quadrático médio os valores confirmam a sua consistência. Por outro lado, apresentando valores de viés médio mais próximos de zero e com menor erro absoluto temos o compósito gerado pelas estações tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne07 no entanto o erro absoluto médio é muito diferente do viés médio resultando num erro quadrático médio e raiz do erro quadrático médio elevados. Finalmente, o compósito obtido pelas estações rsw06, rsw07 e rne07 obtiveram os valores mais elevados em todos os parâmetros. Do Anexo C.4 ao Anexo C.24 estão presentes a tabela de erros de cada compósito para cada ponto de observação.

Para analisar o ajustamento dos valores estimados face aos resultados observados foram realizadas regressões lineares a cada compósito. A análise do modelo linear encontra-se na Tabela 5.13 apresentado os parâmetros β_1 e o coeficiente de determinação, r^2 . A tabela encontra-se organizada de forma descendente pelo parâmetro β_1 .

Tabela 5.13 - Parâmetros do modelo de regressão linear para avaliação das figuras presentes no Anexo C com WRG's obtidos através do programa WAsP para todas as distâncias discutidas no capítulo 1.1.

Distância utilizada	Compósito	Modelo Linear: $y = \beta_0^a + \beta_1 x$	
		β_1	r^2
Minkowsky p=0,5	Compósito 2	1.215	0.651
Manhattan	Compósito 2	1.214	0.650
Minkowsky p=1,5	Compósito 2	1.214	0.649
Euclidiana 3D	Compósito 2	1.213	0.649
Euclidiana	Compósito 2	1.213	0.649
Minkowsky p=4	Compósito 2	1.212	0.649
Chebyshev	Compósito 2	1.212	0.648
Minkowsky p=0,5	Compósito 3	0.985	0.659
Manhattan	Compósito 3	0.984	0.649
Chebyshev	Compósito 3	0.984	0.645
Minkowsky p=1,5	Compósito 3	0.984	0.646
Minkowsky p=4	Compósito 3	0.984	0.645
Euclidiana 3D	Compósito 3	0.984	0.649
Euclidiana	Compósito 3	0.984	0.645
Minkowsky p=0,5	Compósito 1	0.764	0.865
Manhattan	Compósito 1	0.762	0.876
Minkowsky p=1,5	Compósito 1	0.761	0.883
Euclidiana	Compósito 1	0.760	0.884
Euclidiana 3D	Compósito 1	0.760	0.884
Minkowsky p=4	Compósito 1	0.759	0.886
Chebyshev	Compósito 1	0.759	0.888

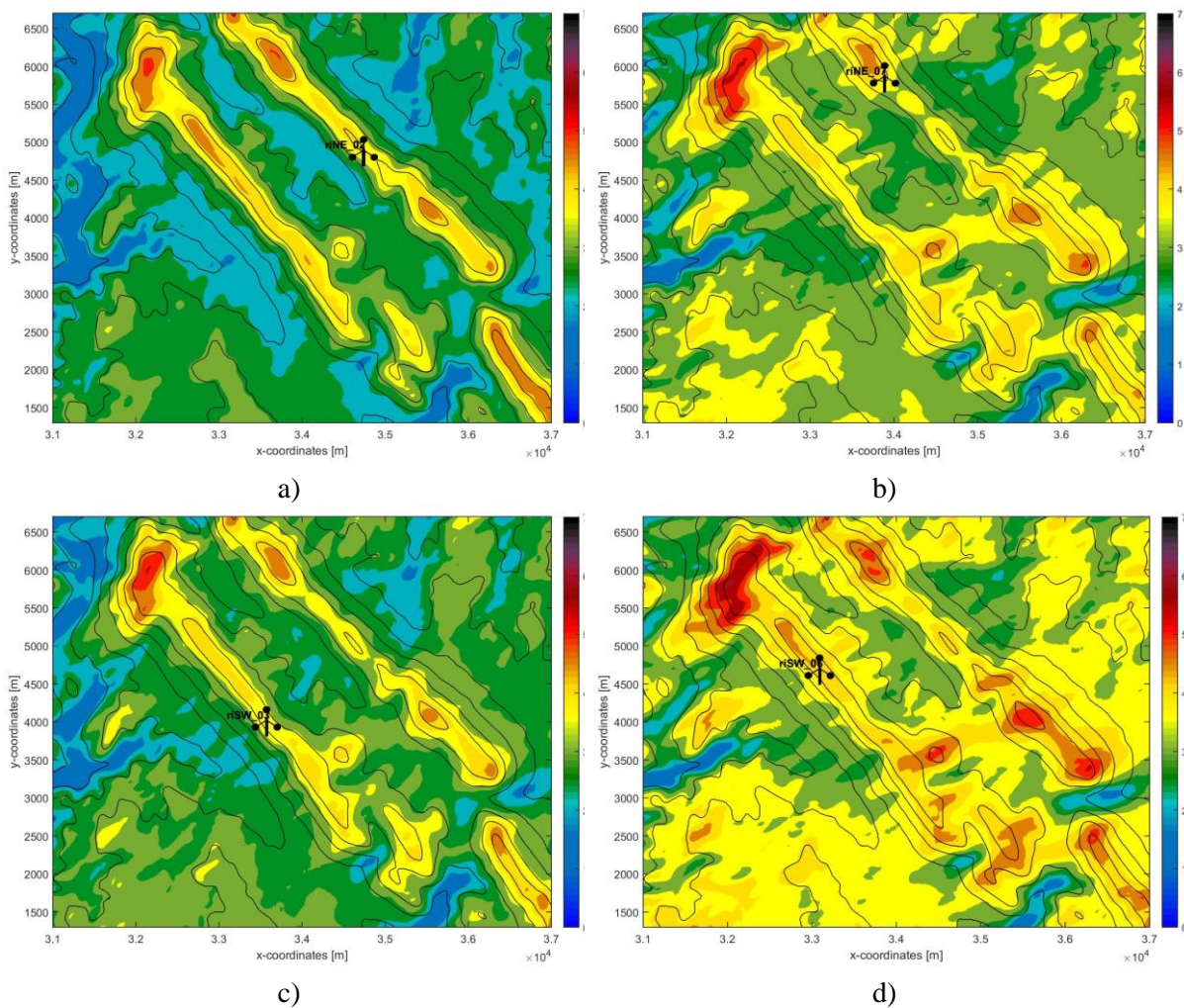
^a é sempre igual a zero visto que o modelo linear forçou a intersecção em (0,0)

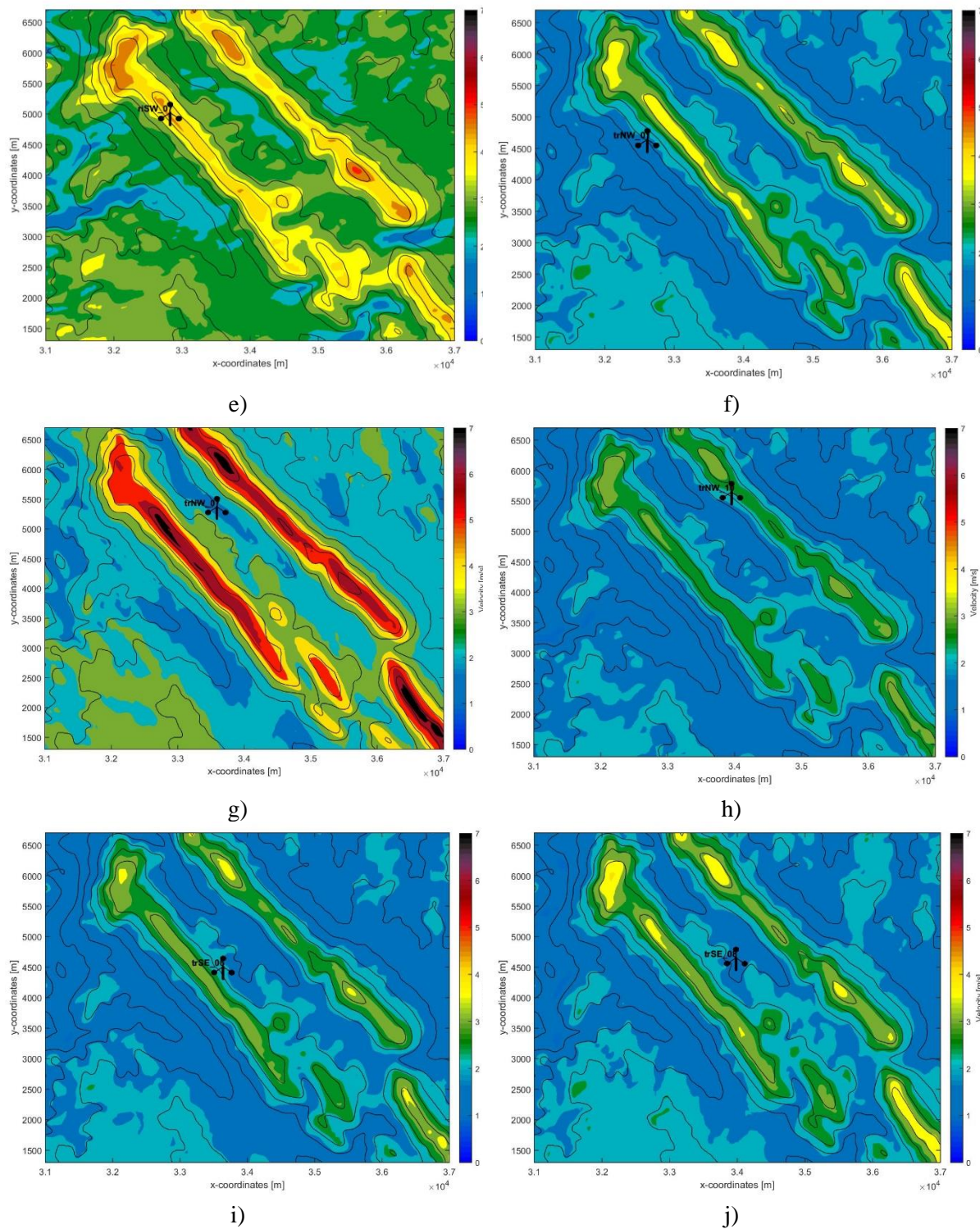
As retas com o comportamento mais desejável são as retas obtidas pelo compósito 3 com β_1 mais próximo de 1. Os restantes resultados obtidos pelos compósitos 1 e 2 tem um valor de β_1 insatisfatório, no entanto o compósito 1 obteve melhor coeficiente de correlação indicando um melhor ajuste dos pontos à reta obtida. Ainda assim o valor positivo de β_1 para o compósito 2 indica que este tende a sobrestimar a velocidade do vento, e o valor negativo de β_1 para o compósito 1 mostra que este tende a subestimar.

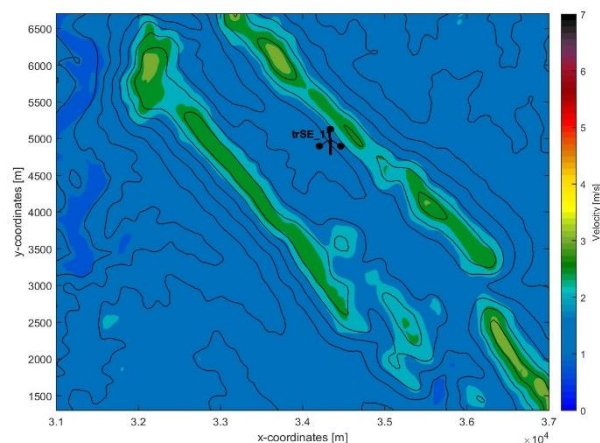
5.1.6. Comparação de modelo linear com modelo CFD

5.1.6.1. Modelo Linear - WAsP

Com os ficheiros clima do caso de estudo 1 foram gerados 11 WRG's através do programa WAsP. Com os ficheiros gerados mapearam-se através da ferramenta WRG Calculator obtendo os seguintes mapas de recurso:







l)

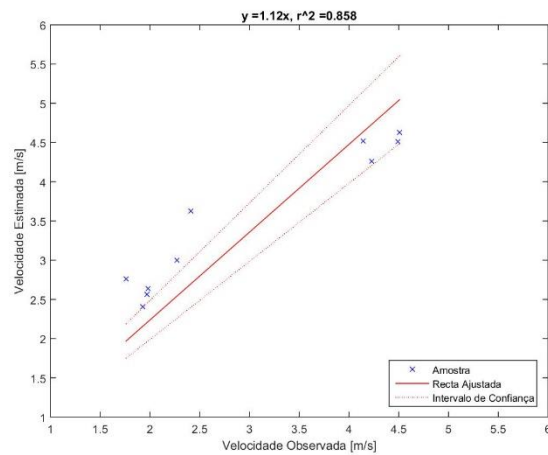
Figura 5.16 – Mapeamento do recurso eólico da Serra do Perdigão obtido através das grelhas de recurso do WAsP: a) rne02; b) rne07; c) rsw03; d) rsw06; e) rsw07; f) tnw01; g) tnw07; h) tnw10; i) tse06; j) tse08; l) tse11

Verifica-se pelos mapas de recurso b), d) e g) da Figura 5.16, correspondentes às estações rne07, rsw06, e tnw07, em comparação, tendem a sobrestimar o recurso do vento. Por outro lado, os mapas de recurso l), i) e h) correspondentes às estações tnw10, tse06 e tse11, tendem a subestimar o recurso do vento. Foram avaliados os erros médios para cada mapa de recurso gerado de acordo com a metodologia apresentada e os resultados encontram-se na Tabela 5.14.

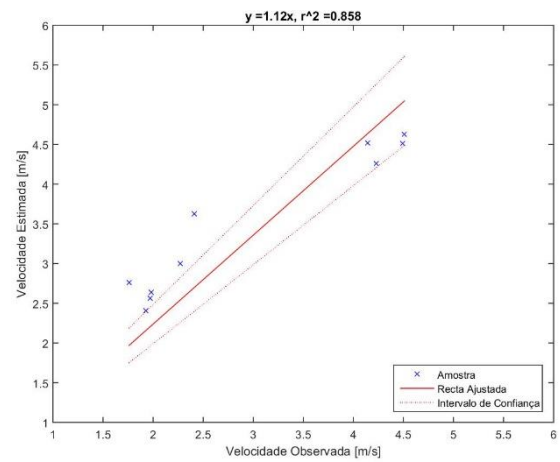
Tabela 5.14. - Erros médios dos mapas de recurso gerados pelo WAsP de cada estação anemométrica.

Estação	Viés Médio [m/s]	Erro Absoluto Médio [m/s]	Erro Quadrático Médio [m ² /s ²]	Raiz do Erro Quadrático Médio [m/s]	Erro Normalizado
rne02	0.521	0.521	0.417	0.646	24.01%
rne07	0.198	0.339	0.186	0.432	14.47%
rsw03	0.396	0.396	0.267	0.517	17.39%
rsw06	0.439	0.439	0.301	0.549	19.20%
rsw07	0.361	0.366	0.247	0.497	16.45%
tnw01	0.044	0.289	0.134	0.366	11.10%
tnw07	0.809	0.809	0.745	0.863	29.61%
tnw10	-0.661	0.704	0.816	0.903	18.51%
tse06	-0.338	0.491	0.343	0.586	14.07%
tse08	-0.284	0.505	0.359	0.599	14.59%
tse11	-0.851	0.851	1.071	1.035	23.40%

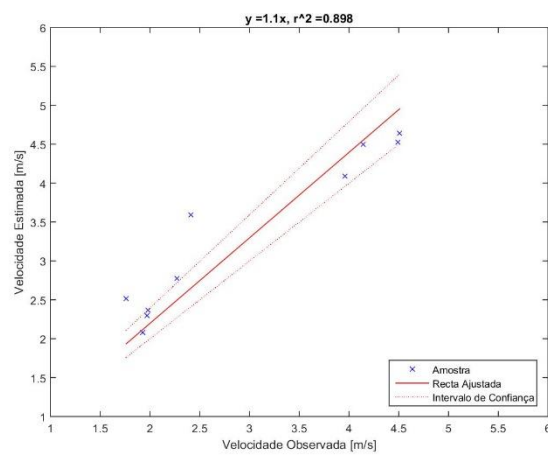
Analisando a Tabela 5.14 verifica-se que o mapa de recurso com o viés mais perto dos 0 m/s, menor erro médio absoluto e erro médio normalizado é o mapa gerado com o ficheiro WRG da estação tnw01, por outro lado o mapa de recurso com o erro médio quadrático e a raiz do erro quadrático médio maior é o mapa gerado com o ficheiro WRG da estação tse11. De seguida, através de uma regressão linear simples para todos as estações obteve-se a Figura 5.17.



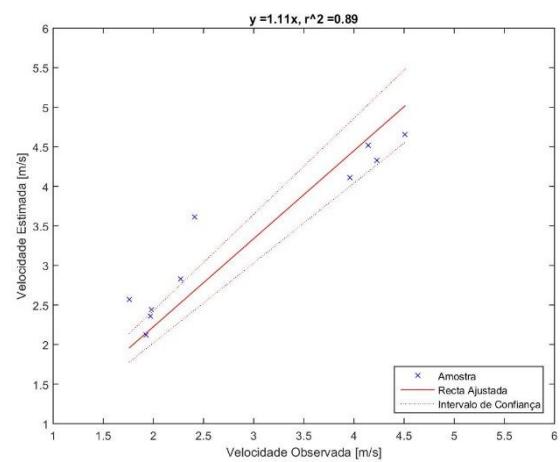
a)



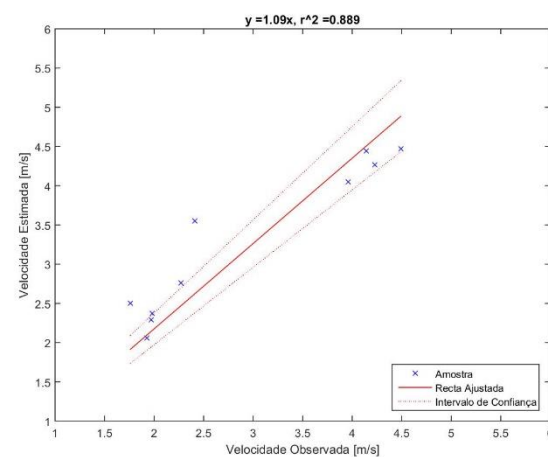
b)



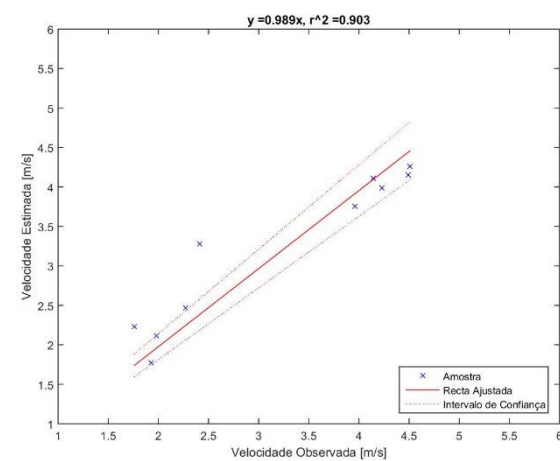
c)



d)



e)



f)

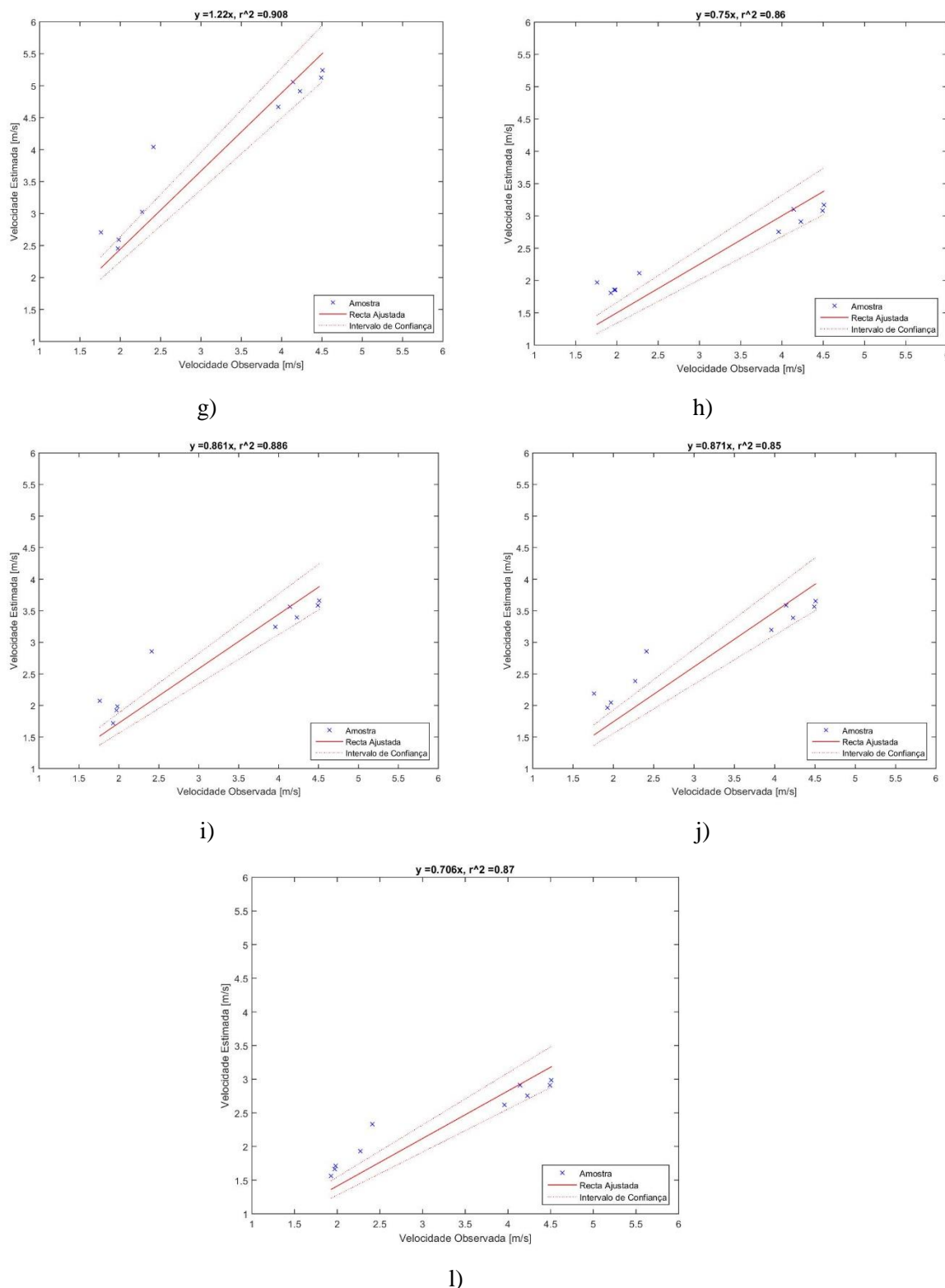


Figura 5.17 - Regressão linear à origem da velocidade observada com a velocidade estimada para cada estação com o mapa de recurso obtido através do WAsP: a) rne02; b) rne07; c) rsw03; d) rsw06; e) rsw07; f) tnw01; g) tnw07; h) tnw10; i) tse06; j) tse08;

As regressões lineares que aparentam melhores resultados são as regressões em c), d), e) e f) da Figura 5.17, correspondentes às estações rsw03, rsw06, rsw07 e tnw01. Os parâmetros da regressão linear estão discriminados na Tabela 5.15. Os coeficientes de correlação linear, r^2 , não são considerados satisfatórios não ultrapassando os 0.908. No entanto os melhores resultados aparentam ser das estações

rsw03, rsw07, rsw06 e tnw01, onde o declive β_1 para estas estações é mais próximo de 1 e os coeficientes de correlação linear também são dos mais elevados.

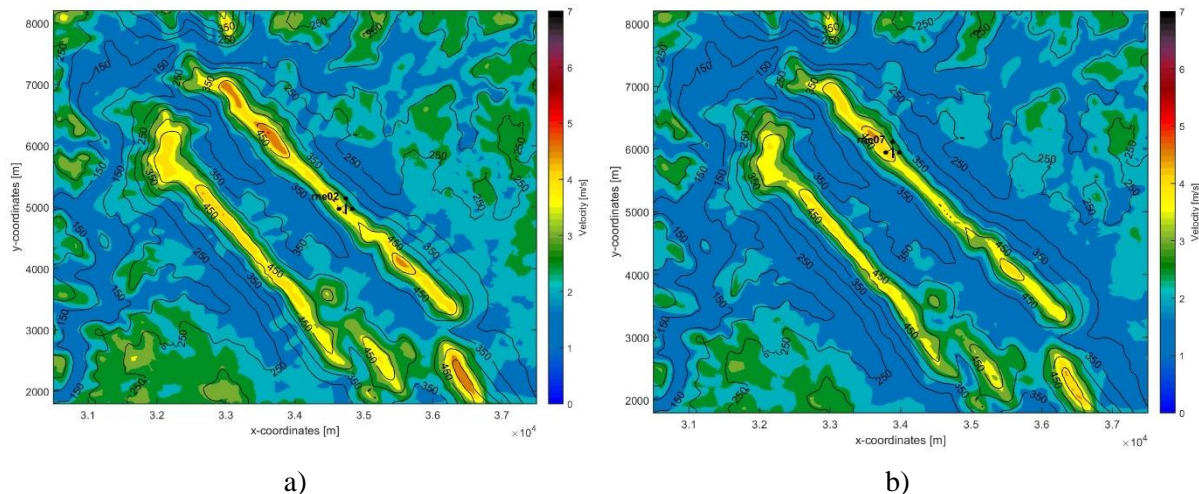
Tabela 5.15. - Parâmetros do modelo de regressão linear para avaliação dos mapas de recurso obtidos pelo WAsP.

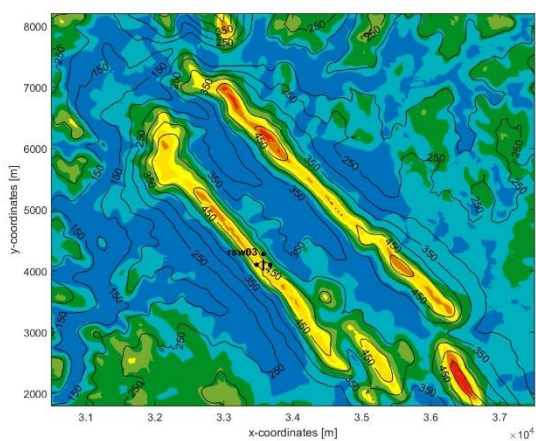
Estação	Modelo Linear: $y = \beta_0^a + \beta_1 x$	
	β_1	r^2
rne02	1.119	0.858
rne07	1.026	0.882
rsw03	1.099	0.898
rsw06	1.113	0.890
rsw07	1.088	0.889
tnw01	0.989	0.903
tnw07	1.222	0.908
tnw10	0.750	0.860
tse06	0.861	0.886
tse08	0.871	0.850
tse11	0.706	0.870

^a é sempre igual a zero visto que o modelo linear forçou a intersecção em (0,0).

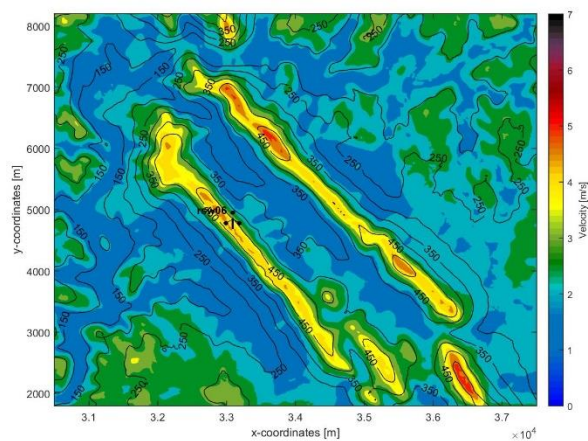
5.1.6.2. Modelo não linear – WindSim

Com os ficheiros clima do caso de estudo 1 foram gerados 11 WRG's através do programa *WindSim*. Com os ficheiros gerados mapearam-se através da ferramenta WRG Calculator obtendo os seguintes mapas de recurso:

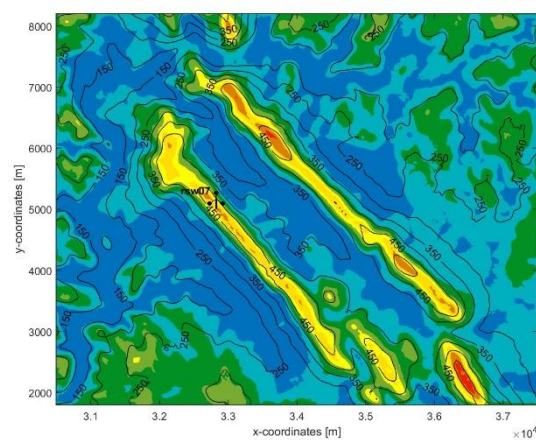




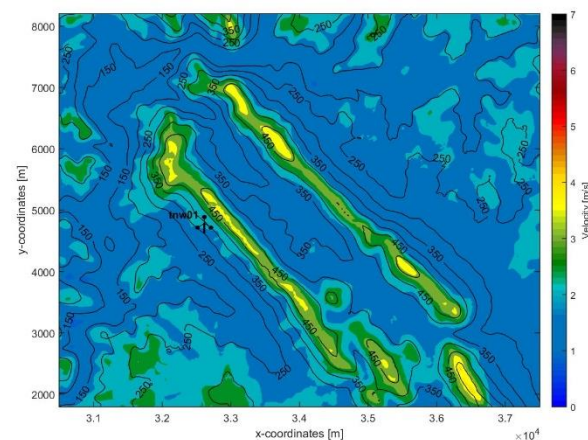
c)



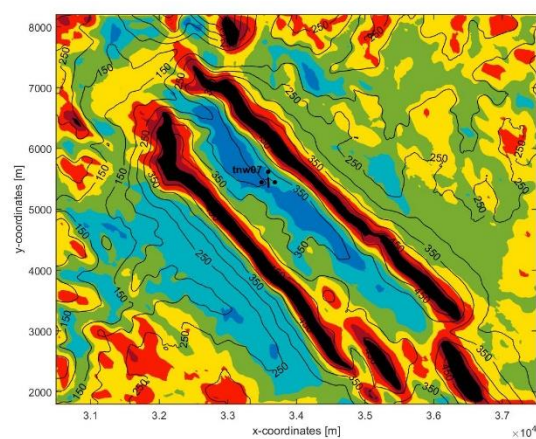
d)



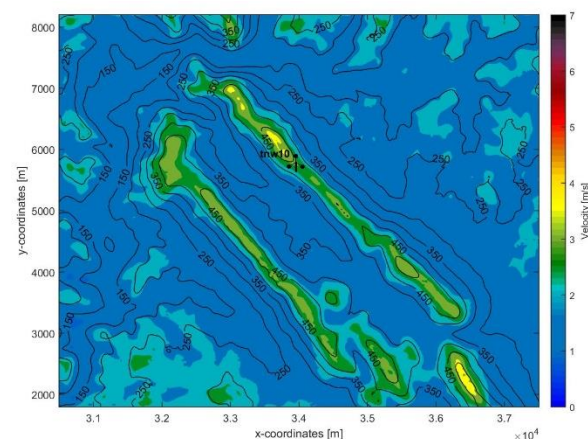
e)



f)



g)



h)

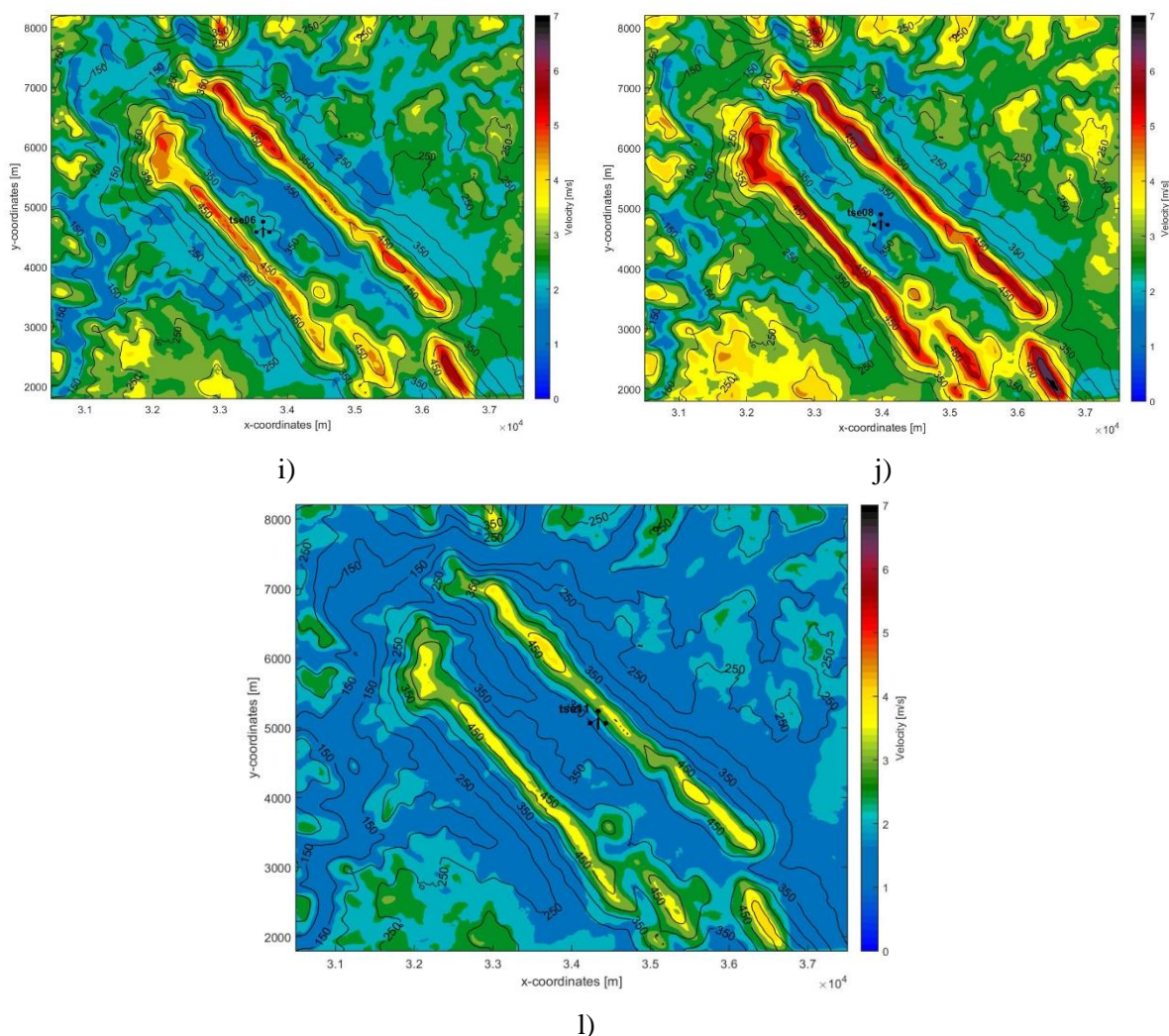


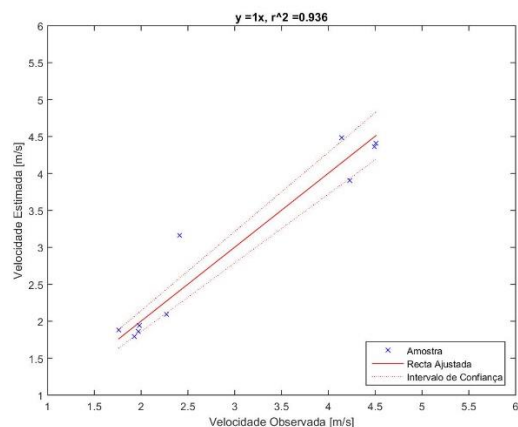
Figura 5.18 – Mapeamento do recurso eólico da Serra do Perdigão obtido através das grelhas de recurso do WindSim:
a) rne02; b) rne07; c) rsw03; d) rsw06; e) rsw07; f) tnw01; g) tnw07; h) tnw10; i) tse06; j) tse08; l) tse11

Verifica-se pelos mapas de recurso g), i) e j) da Figura 5.16, correspondentes às estações tnw07, tse06 e tse08, tendem a sobrestimar o recurso do vento. Por outro lado, os mapas de recurso f), h) e l) correspondentes às estações tnw01, tnw10 e tse11, tendem a subestimar o recurso do vento. Foram avaliados os erros médios para cada mapa de recurso gerado de acordo com a metodologia apresentada e os resultados encontram-se na Tabela 5.16.

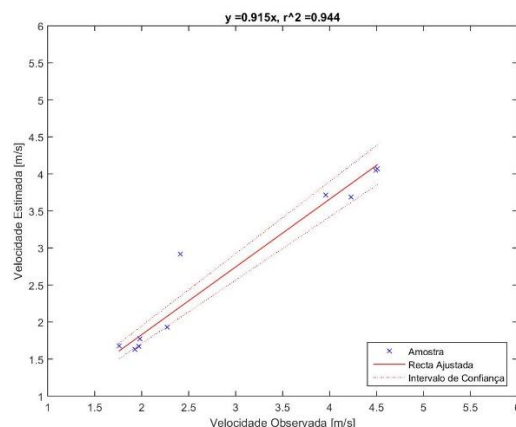
Tabela 5.16. - Erros médios dos mapas de recurso gerados pelo WindSim de cada estação anemométrica.

Estação	Viés Médio [m/s]	Erro Absoluto Médio [m/s]	Erro Quadrático Médio [m/s]	Raiz do Erro Quadrático Médio [m/s]	Erro Médio Normalizado
rne02	0.021	0.222	0.099	0.315	8.11%
rne07	-0.239	0.341	0.069	0.262	12.06%
rsw03	0.118	0.271	0.134	0.366	10.06%
rsw06	0.108	0.248	0.123	0.350	9.26%
rsw07	0.095	0.247	0.118	0.343	9.33%
tnw01	-0.535	0.599	0.092	0.304	18.44%
tnw07	2.884	2.884	0.879	0.938	82.54%
tnw10	-0.747	0.747	0.035	0.186	22.39%
tse06	0.454	0.466	0.166	0.407	14.21%
tse08	-1.102	1.102	0.100	0.317	31.06%
tse11	2.028	2.146	1.075	1.037	61.69%

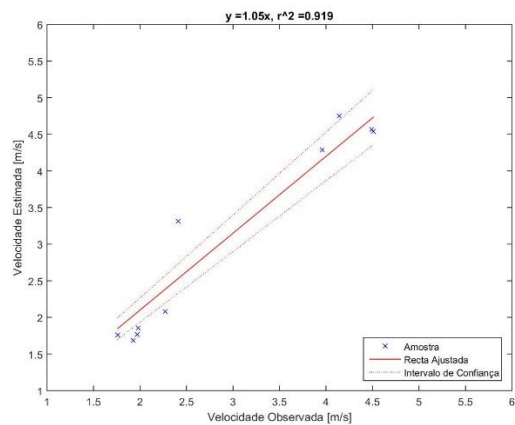
Analisando a Tabela 5.16. verifica-se que o mapa de recurso com o viés mais perto dos 0 m/s, menor erro médio absoluto e erro médio normalizado é o mapa gerado com o ficheiro WRG da estação rne02, por outro lado o mapa de recurso com o erro médio quadrático e a raiz do erro quadrático médio é o mapa gerado com o ficheiro WRG da estação tnw10.



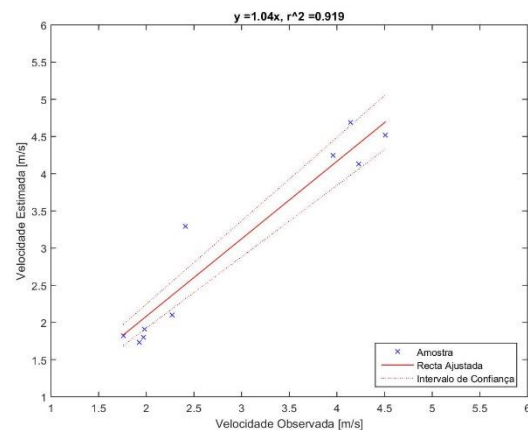
a)



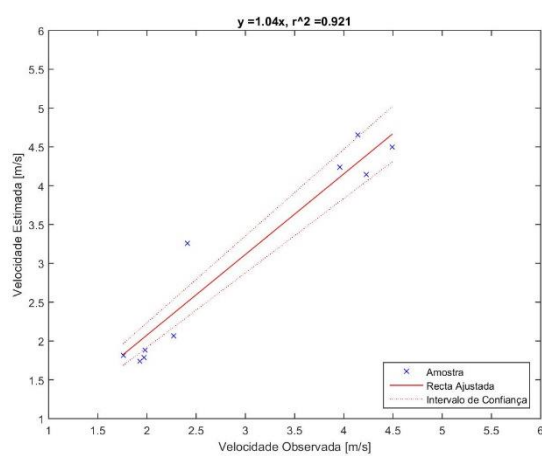
b)



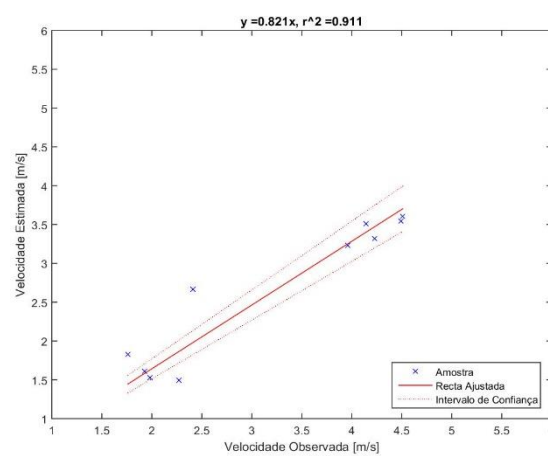
c)



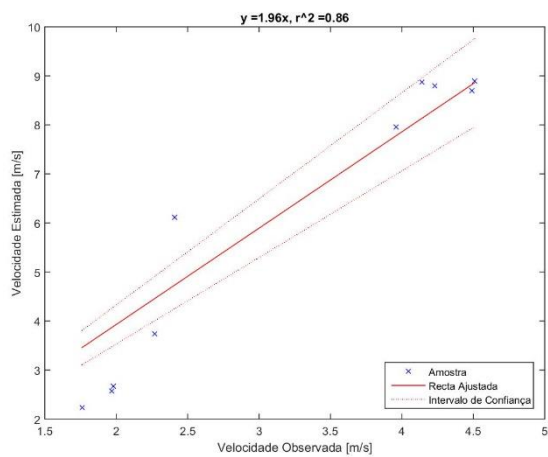
d)



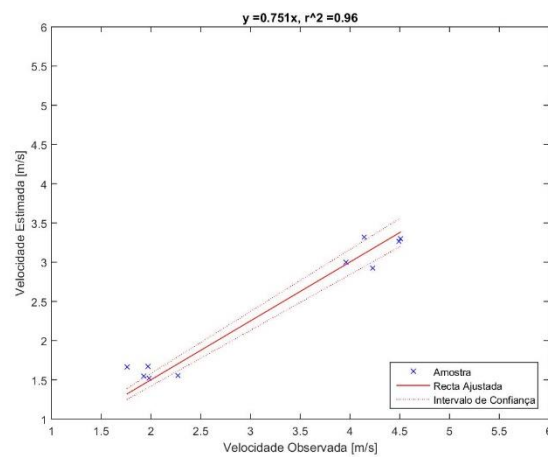
e)



f)



g)



h)

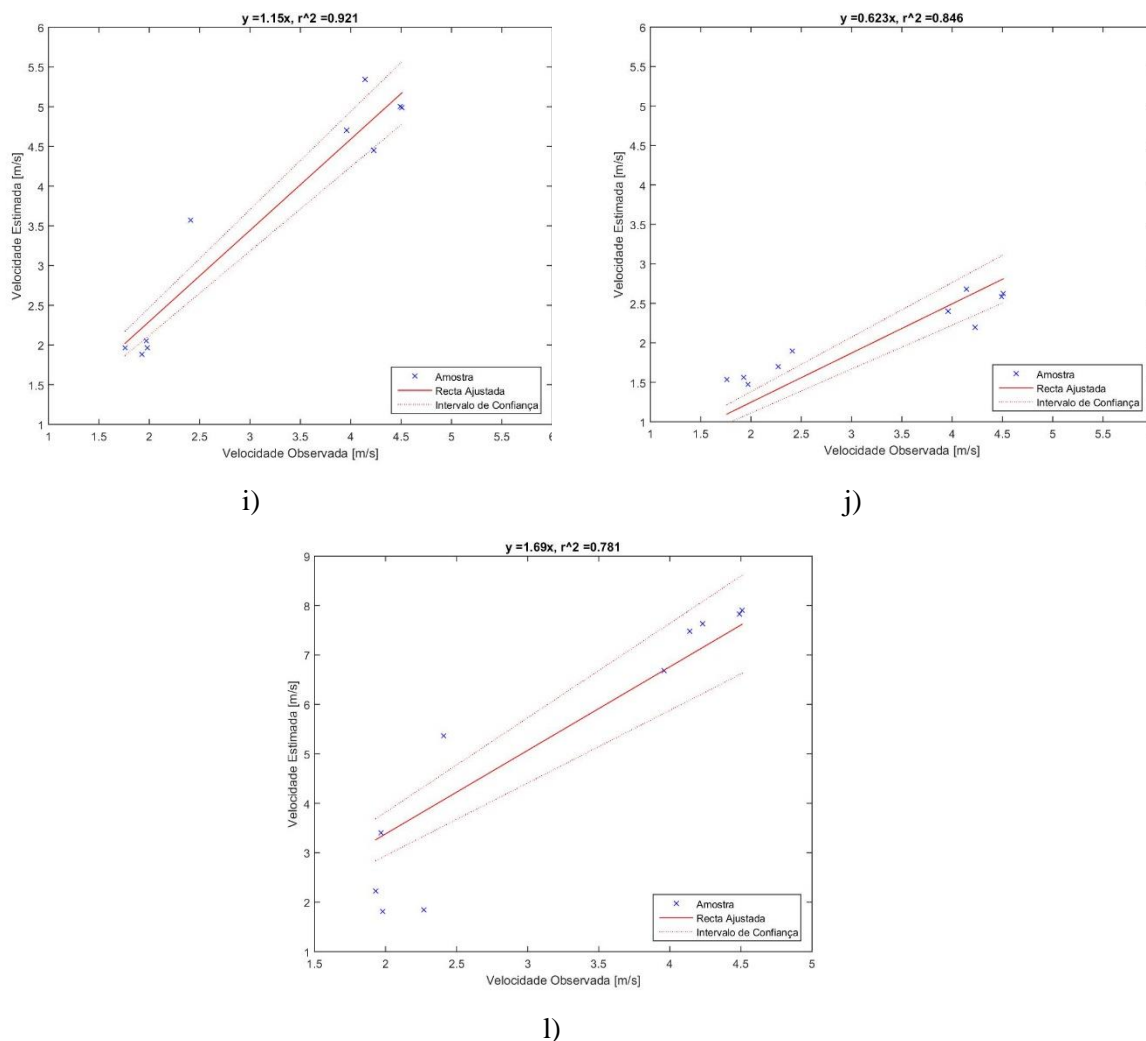


Figura 5.19 – Regressão linear à origem da velocidade observada com a velocidade estimada para cada estação com o mapa de recurso obtido através do WindSim: a) rne02; b) rne07; c) rsw03; d) rsw06; e) rsw07; f) tnw01; g) tnw07; h) tnw10; i) tse06; j) tse08;

A Figura 5.19 contém o resultado de onze regressões lineares contendo cada uma o par de amostra, velocidade observada no eixo horizontal e a velocidade estimada no eixo vertical, a reta ajustada da regressão linear e duas linhas representando o intervalo de confiança de 95%. As regressões lineares que aparentam melhores resultados são as regressões em a), b), c), d), e e) da Figura 5.19, correspondentes às estações rne02, rne07, rsw03, rsw06 e rsw07. Os parâmetros da regressão linear estão discriminados na Tabela 5.17. A maioria dos coeficientes de correlação linear, r^2 , também não são satisfatórios não ultrapassando os 0.944 da estação rne07. No entanto, maior coeficiente de correlação linear pertence à estação tnw10 mas a regressão linear tem um dos piores resultados em termos de declive, β_1 . Os melhores resultados aparentam ser das estações rne02, rne07, rsw03, rsw06 e rsw07 onde o declive β_1 para estas estações é mais próximo de 1 e os coeficientes de correlação linear também são dos mais elevados.

Tabela 5.17. – Parâmetros do modelo de regressão linear para avaliação dos mapas de recurso obtidos pelo WindSim.

Estação	Modelo Linear: $y = \beta_0^a + \beta_1 x$	
	β_1	r^2
rne02	1.001	0.936
rne07	0.915	0.944
rsw03	1.050	0.919
rsw06	1.042	0.919
rsw07	1.038	0.921
tnw01	0.821	0.911
tnw07	1.965	0.860
tnw10	0.751	0.960
tse06	1.148	0.921
tse08	0.623	0.846
tse11	1.690	0.781

^a é sempre igual a zero visto que o modelo linear forçou a intersecção em (0,0).

5.2. Caso de estudo 2 - Serra da Freita

A metodologia desenvolvida em [9] pelo LNEG foi implementada com os dados disponíveis da Serra da Freita, desta forma achou-se pertinente estudar as grelhas de recurso utilizadas. Existindo apenas quatro estações anemométricas não é viável aplicar a metodologia e validar os resultados, desta forma apenas foi replicado o estudo dos parâmetros da Serra da Freitas e utilizar os dados orográficos para validar a implementação do cálculo do RIX na ferramenta desenvolvida.

5.2.1. Tratamento de dados da Serra da Freita – Caso de estudo 2

Foram disponibilizados pelo LNEG os quatro mapas de recurso gerados pelo *WAsP* relativamente às quatro estações anemométricas identificadas na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Dados e identificação das estações anemométricas na Serra da Freita

Nome da torre	Cota [m]	Altura da torre [m]	Localização (Datum LX)	
			Paralelo [m]	Meridiano [m]
A	1084	40	434134	190226
B	1090	40	435078	189799
C	1015	40	435024	191562
D	1041	40	433786	192239

Os períodos de observação das estações identificadas na tabela tiveram início a 17 de abril de 2001 com fim dos registos a 31 de março de 2002, totalizando 348 dias de registos a uma frequência de 10 min. Também foi disponibilizado o mapa de terreno da Serra da Freita – Figura 5.20.

Os dados temporais de cada estação juntamente com o mapa topográfico e rugosidade foram processados pela equipa do LNEG no programa *WAsP*, após foram exportados os respetivos ficheiros de mapa de recurso (.wrg). Juntamente a estes, foram disponibilizados os dados estatísticos da velocidade média ajustada, fluxo de potência e os parâmetros de *Weibull*, A e k, presentes na Tabela 5.19.

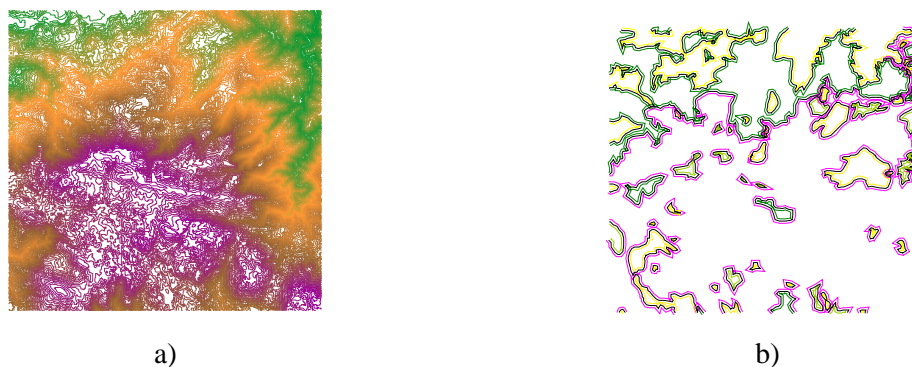


Figura 5.20 - Mapeamento da zona da Serra da Freita; a) mapa topográfico; b) mapa de rugosidade. Fonte: Map editor do WAsP

Tabela 5.19 - Dados estatísticos da velocidade média, fluxo de potência e parâmetros de Weibull A e k.

Estação	A [m/s]	k	Fluxo de Potência [W/m ²]	Velocidade Média Observada [m/s]
A	7,4	1,61	440	6,63
B	7,4	1,53	487	6,7
C	7,4	1,72	391	6,55
D	7,2	1,78	344	6,38

5.2.2. Análise de dados

Analogamente ao caso de estudo 1 efetuou-se o mesmo estudo à campanha da Serra da Freita. O caso da Serra da Freita foi utilizado pelos autores de [9] para validação do método multi-compósito, desta forma será interessante fazer a mesma análise efetuada no caso de estudo 1 para comparação de resultados com o trabalho efetuado em [9].

Portanto, analisando os viés das tabelas presentes no Anexo A.1, construiu-se a Tabela 5.20. A amostra da campanha meteorológica da Serra da Freita provém de quatro estações anemométricas a 40 m de altura. Todas as estações anemométricas da Serra da Freita encontram-se no topo de montanhas. A Tabela 5.20 encontra-se organizada por altitude descendente. Foram utilizados os mesmos parâmetros para a atribuição da cor a cada entrada da tabela mas os valores apresentados são os *viés* relativos às observações das estações anemométricas da serra da Freita.

Tabela 5.20. – Análise de Viés de todas as estações em estudo da serra da Freita. Cada entrada apresenta um tom de vermelho, azul ou branco, dependendo do valor do viés: $0 \text{ m/s} < \text{viés} \leq 2 \text{ m/s}$ - cor vermelha; $-2 \text{ m/s} \leq \text{viés} < 0 \text{ m/s}$ - cor azul; $\text{viés} \approx 0 \text{ m/s}$ cor mais clara ou branca.

Desvio		Valores Estimados [m/s]				Média Absoluta [m/s]
		B	A	D	C	
Estações Anemométricas	B	-	-0.55	0.10	0.48	0.38
	A	1.37	-	0.98	1.25	1.20
	D	0.51	-0.44	-	0.50	0.49
	C	0.28	-0.57	-0.02	-	0.29
	Média Absoluta	0.72	0.52	0.37	0.75	

Através da análise da Tabela 5.20, sobressai a linha referente à estação A, ao seja o recurso mapeado após processamento dos dados provenientes desta estação sobrestimaram o recurso eólico na localização das restantes estações. Ao mesmo tempo, ao observar a coluna respetiva à estação A, que se refere às estimativas das restantes estações para localização da estação A, todas subestimaram o recurso eólico neste ponto. Isto pode indicar que os registo efetuados em A podem ter algum problema na sua medição, ou então, ocorre algum fenómeno não linear em A e o *WAsP* não consegue lidar ou prever este possível comportamento. Tal como na análise em [9] a estação A é a estação que mais sobrestima o recurso eólico na área de interesse.

De seguida analisou-se o impacto da distância no viés para verificar se existe alguma relação entre estes. Com os valores tabelados no Anexo A.1 e as distâncias absolutas *D* calculadas analogamente ao caso de estudo 1 obteve-se a Figura 5.21.

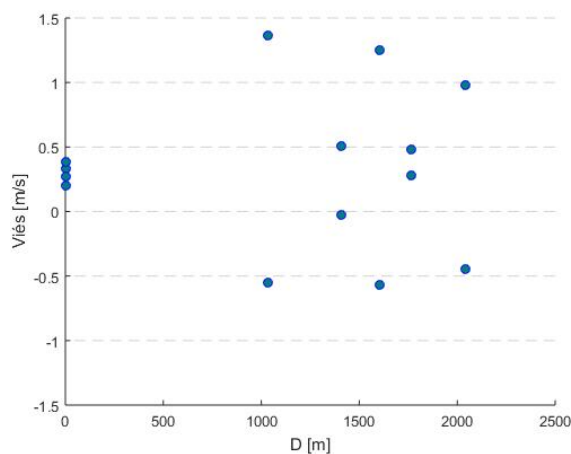


Figura 5.21. – Gráfico de dispersão do viés ao longo de *D* para a serra da Freita.

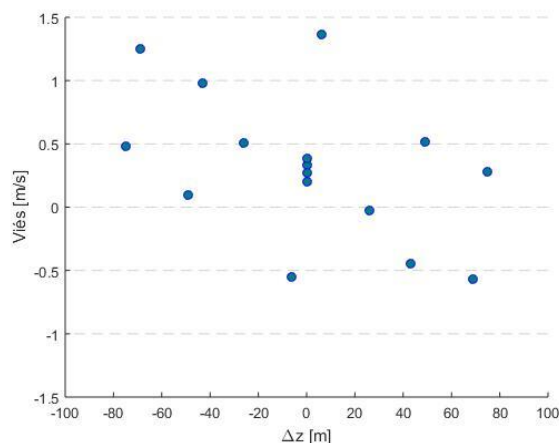


Figura 5.22. – Gráfico de dispersão do viés com Δz para as estações anemométricas da serra da Freita..

Da análise da Figura 5.21, observa-se que *viés* não é dependente de D . Observa-se que o viés mantém-se entre os -0.5 m/s e os 1.5 m/s e ao longo do eixo dos xx 's tem uma distribuição aleatória, tal como observado anteriormente no caso de estudo 1, não mostrando qualquer sinal de dependência pela distância D .

De seguida, foi calculado o Δz e traçou-se o gráfico de dispersão com este, originado a Figura 5.22. Da análise da figura, embora o número das amostras seja menor, verifica-se que para um Δz negativo o *viés* é positivo, para Δz positivo metade do *viés* é positivo e a outra metade negativa. Tal como no caso de estudo 1, verifica-se uma menor consistência quando $\Delta z > 0$ m.

Criou-se então o gráfico de dispersão do viés ao longo da altitude com o convexo de Hull obtendo assim a Figura 5.23. Analisado a figura verifica-se que quando Δz é negativo o viés tende a ser positivo, com uma exceção aos 1084 m de altitude onde uma amostra com Δz negativo tem um viés negativo, e quando Δz é positivo verificam-se três ocasiões de *viés* negativo e duas com *viés* positivo. Nesta imagem o convexo de Hull não reflete a mesma situação que na Figura 5.5, embora exista diferença de altitudes a gama de altitudes é diferente pois no caso de estudo 1 a altitude varia dos 300 m aos 470 m perfazendo 170 m de Δz máximo, neste caso varia entre 1015 m a 1090 m perfazendo 75 m Δz máximo.

Criando a análise de diagrama de caixa para este caso de estudo obteve-se a Figura 5.24. a)

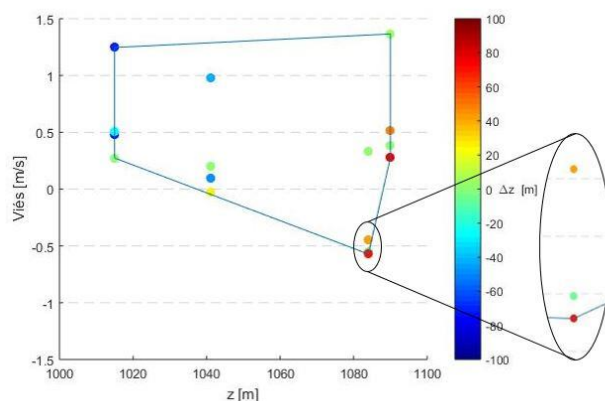


Figura 5.23. – Gráfico de dispersão do viés obtido para cada estimativa efetuada para cada altitude com barra de cor correspondente à diferença de altitude para o caso de estudo da serra da Freita. No zoom com os três pontos o intervalo entre as linhas horizontais a tracejado correspondem a 0.05 m/s.

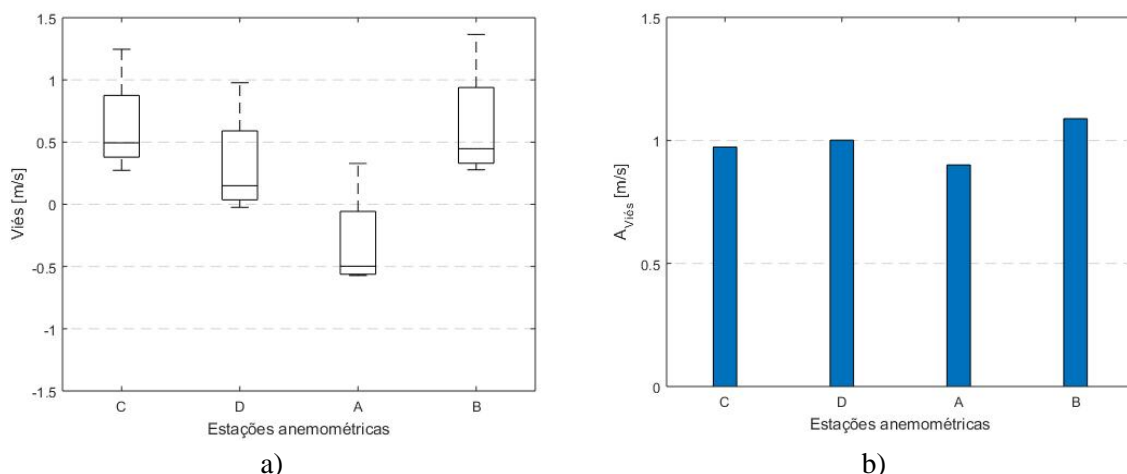


Figura 5.24. – a) Diagrama de caixa do viés por estação anemométrica para o caso de estudo da serra de Freitas; b) Diagrama de barras da amplitude para cada estação anemométrica para o caso de estudo da serra do Perdigão.

Em primeira instância é importante referir que cada diagrama de caixa apenas tem quatro valores de amostra o que torna a interpretação desta figura tendenciosa. No entanto, pela análise da Figura 5.24 a) verificou-se que a maioria das medianas são positivas, apenas as estimativas para a estação A é que se encontra com $viés < 0 \text{ m/s}$. Verificou-se também que o valor mais elevado do viés, o máximo, para cada estação encontra-se deslocado da mediana comparando aos outros valores estatísticos como o 1º e 3º quartil e o mínimo. Analisando estes valores juntamente com o Anexo A.1, correspondente à análise individual dos valores estimados pela estação A, verifica-se que todos os máximos do diagrama de caixa correspondem a estimativas efetuadas por A. Este deslocamento grande da mediana sugere que A, como mencionado anteriormente, tenha algum erro associado, tal como o registo dos dados ou fenómenos que modelos lineares não conseguem resolver. Outro ponto a assinalar é a amplitude $A_{viés}$ que é muito semelhante para as quatro estações, Figura 5.24 b). Analisando esta figura verificou-se valores muito semelhantes de $\pm 1 \text{ m/s}$ de amplitude. Tendo em conta que a diferença de cotas não é muito grande e além disso todas as estações se encontram no topo de cumeadas, segundo o caso de estudo 1, estar-se-ia à espera que a amplitude fosse menor no entanto pelo diagrama de caixas na Figura 5.24 se as estimativas efetuadas por A fossem consideradas como *outliers* e desta forma não consideradas nesta análise os valores da amplitude seriam muito menores.

De seguida fez-se a análise da diferença de altitude e a diferença de velocidade observada. Assim sendo, utilizando os dados da velocidade observada e de altitude e segundo as equações Equação 4.2 e Equação 4.4 calculou-se Δz e Δv respetivamente, obtendo assim a Figura 5.25.

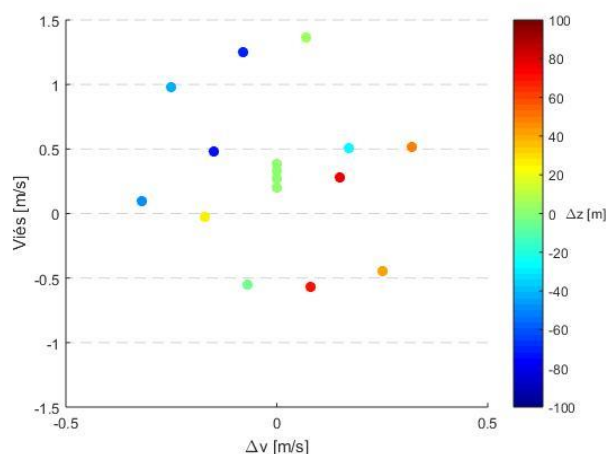


Figura 5.25. – Gráfico de dispersão do viés com a diferença de velocidades, Δv , e barra de cor com a diferença de altitude, Δz para o caso de estudo da serra do Perdigão.

Analisando a Figura 5.25 verificou-se que a diferença das velocidades médias observadas pela estação anemométrica entre as várias estações não são consideravelmente diferentes, tendo em conta que a maior diferença é inferior a 0.5 m/s. Considerando os resultados discutidos para a Figura 5.8 pode-se dizer que estes resultados enquadram-se no conjunto 2, descrito no subcapítulo anterior. No entanto os valores do viés para este caso de estudo são maiores.

Desta forma procede-se para a análise dos perfis diários do vento para cada estação anemométrica a 40 m de altura para serra da Freita, Figura 5.26. Analisando a figura, verificaram-se perfis diários semelhante para todas as estações, sendo a maior diferença a intensidade do vento nos períodos das 0 h as 12 h e das 19 h às 24 h, confirmando que pelo menos que as estações que se encontram no topo de uma montanha tendem a ter um perfil semelhante. Existindo alguma estação anemométrica na encosta da montanha provavelmente iria-se observar um perfil diário distinto tal como observado no primeiro caso de estudo.

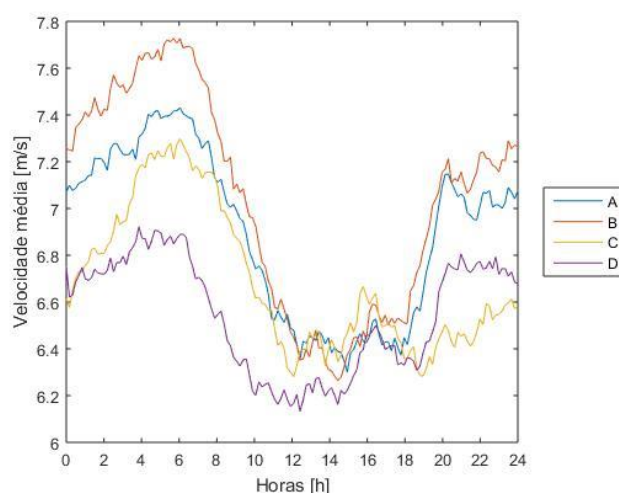


Figura 5.26. – Perfil diário serra da Freita com anemómetro a 40 m de altura.

Calculando os valores de RIX para cada estação da Serra de Freitas obtêm-se a Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Valores de RIX para cada estação anemométrica da Serra de Freitas

Estação	A	B	C	D
RIX (%)	13.92	18.70	21.80	18.40

Com os valores de RIX pode-se então proceder ao cálculo do indicador de desempenho ΔRIX obtendo assim a Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Valores de ΔRIX entre todas as estações anemométricas da Serra de Freitas.

ΔRIX (%)	A	B	C	D
A	-	4.78	7.88	4.48
B	-4.78	-	3.10	-0.30
C	-7.88	-3.10	-	-3.40
D	-4.48	0.30	3.40	-

Analisando a tabela anterior verifica-se que a estação A corresponde à estação com maior ΔRIX com as restantes estações, este resultado está de acordo com os autores em [36] e clarifica os resultados

anteriores onde a estação A obteve os maiores valores de viés. Ao seja, com um ΔRIX superior é mais provável que exista separação de fluxo no sentido da estação A.

Através do ΔRIX juntamente com o viés calculado previamente obtém-se a Figura 5.27.

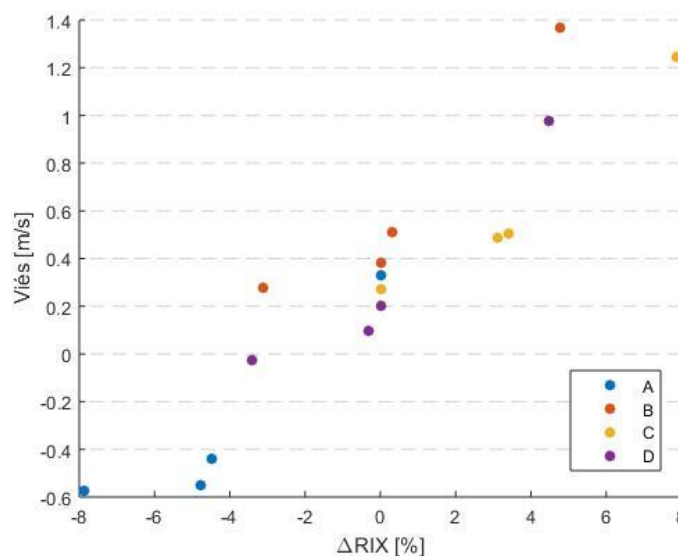


Figura 5.27 - Gráfico de dispersão do indicador de desempenho ΔRIX com o viés para as estações anemométricas da Serra de Freitas.

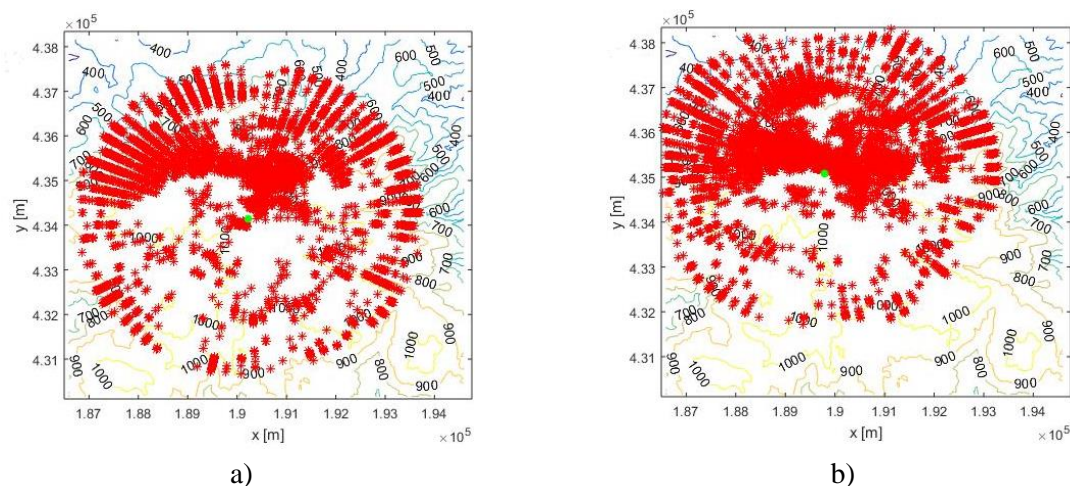
Analisando a Figura 5.27 já se verifica uma relação da correlação entre os dois parâmetros, com uma variação do ΔRIX o viés tende a ser positivo e cada vez maior.

5.3. Implementação do indicador RIX na ferramenta WRG Calculator

De forma a dar mais valor à ferramenta e considerando que o cálculo do RIX poderá ser uma mais valia para a análise do recurso eólico em terrenos complexos decidiu-se implementar o cálculo do mesmo na ferramenta. Para tal é efetuado a avaliação com a ferramenta e com o WAsP em separado e após estes serão comparados. Foram utilizados os dados da Serra da Freita para efeitos de comparação.

5.3.1. Avaliação RIX na ferramenta desenvolvida

Considerando os parâmetros padrão do programa WAsP, ao seja, raio de 3500 m, 12 setores, 6 subsetores e um ângulo crítico de 0.3 rad juntamente com a localização de cada estação disponível na Tabela 5.18 representou-se o RIX para cada estação (Figura 5.28) e calculou-se o RIX por setor (Tabela 5.23).



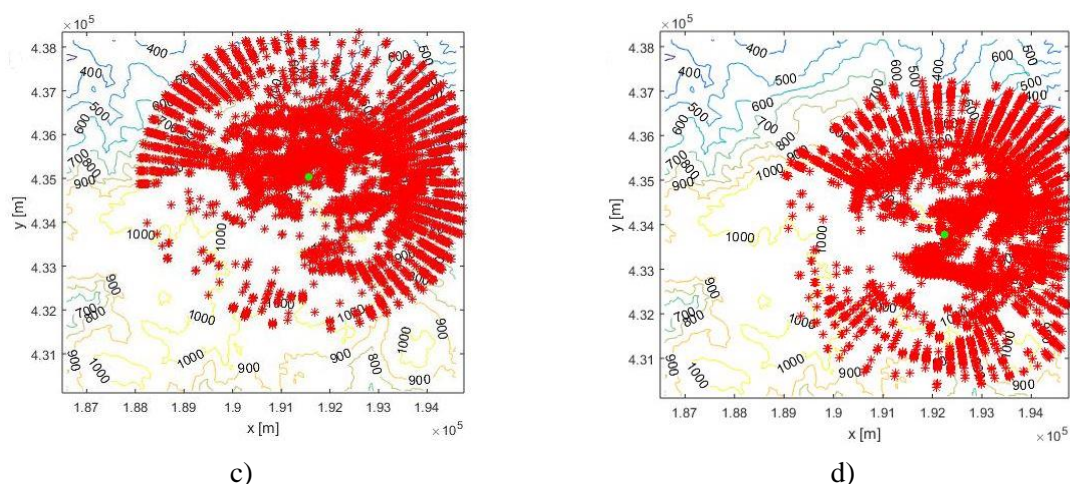


Figura 5.28. – Representação do RIX para as quatro estações anemométricas efetuada pela ferramenta desenvolvida a) Estação A, RIX = 13.92%, b) Estação B, RIX = 18.70%, c) Estação C, RIX = 21.80% e d) Estação D, RIX = 18.40%.

Analisando a Figura 5.28 é importante referir na avaliação das estações B, C e D que o raio de 3500 m ultrapassa os limites do mapa. Na estação B os setores 1, 10 e 12 são limitados pelo limite do mapa. Na estação C os setores 1 e 4 são limitados pelo limite do mapa. Na estação D os setores 3, 4 e 5 são limitados pelo limite do mapa. A Tabela 5.23 contém a avaliação do RIX por setor de forma a poder comparar os valores obtidos não só por valor absoluto mas também para compreender em que setor se encontram as maiores diferenças.

Tabela 5.23. – Avaliação RIX por sector efetuada pela ferramenta desenvolvida

Número de sector	Direção [°]	RIX [%]			
		A	B	C	D
1	0	21.94	17.66	20.80	18.52
2	30	33.05	25.93	19.37	32.48
3	60	13.68	25.07	33.62	29.63
4	90	7.69	11.68	33.90	7.41
5	120	5.13	8.83	24.50	17.09
6	150	5.70	2.56	11.97	21.08
7	180	3.70	2.56	2.28	15.10
8	210	5.13	11.68	2.85	11.97
9	240	5.98	7.41	8.26	1.99
10	270	8.55	37.89	42.74	0.57
11	300	27.92	33.33	33.33	22.79
12	330	25.07	27.92	25.07	19.94
-	Total	13.92	18.70	21.80	18.40

5.3.2. Avaliação do RIX no programa WAsP

Foram utilizados os mesmo parâmetros default na avaliação do RIX para cada uma das estações obtendo a representação visual na Figura 5.29 e os valores do índice RIX na Tabela 5.24.

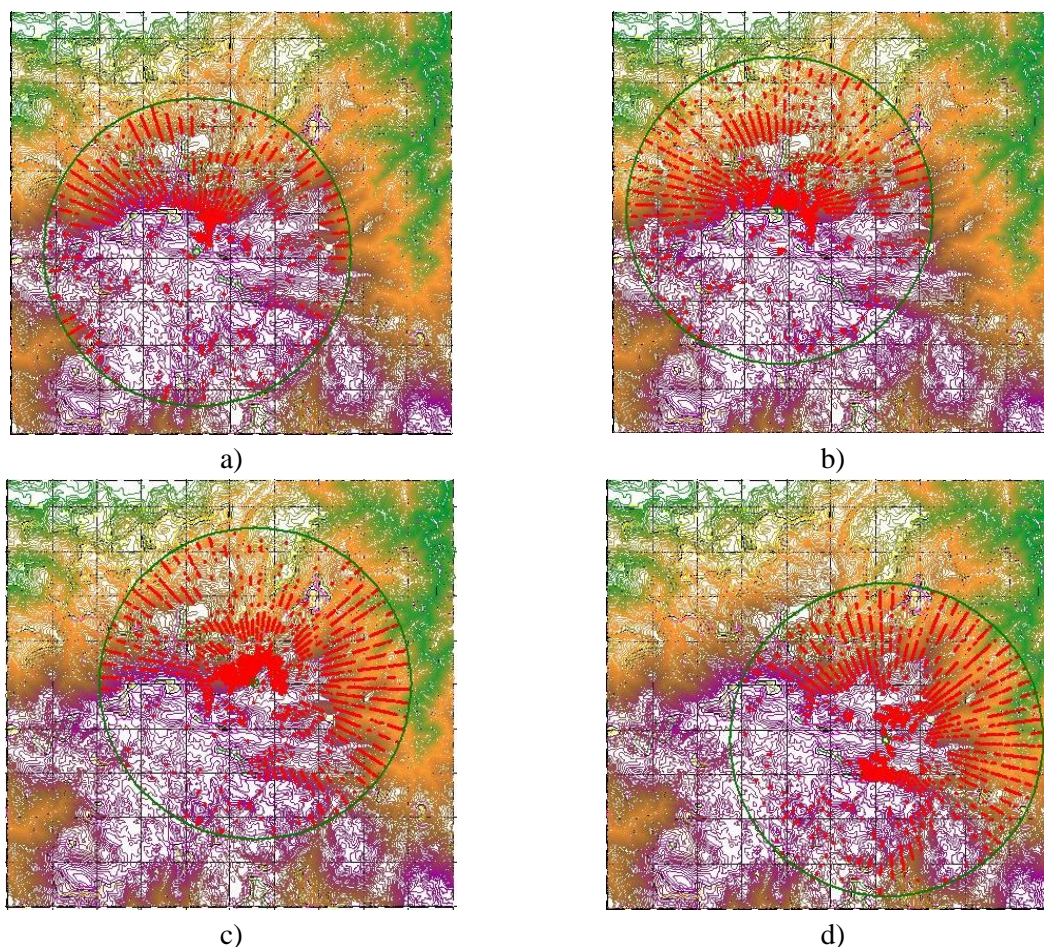


Figura 5.29. - Representação do RIX para as quatro estações anemométricas efetuada pelo WAsP a) Estação A, RIX = 13.73%, b) Estação B, RIX = 18.69%, c) Estação C, RIX = 23.7 % e d) Estação D, RIX = 20.68%.

Na Figura 5.29 em nenhuma das avaliações RIX o raio de 3500 m ultrapassou os limites do mapa.

Tabela 5.24. – Avaliação RIX por sector efetuada pelo programa WAsP.

Número de sector	Direção [°]	RIX [%]			
		A	B	C	D
1	0	24.04	25.79	26.62	25.63
2	30	29.00	24.86	20.74	31.95
3	60	17.16	28.54	37.77	35.49
4	90	10.44	29.68	42.04	35.80
5	120	4.88	9.94	25.93	18.19
6	150	3.90	3.10	13.98	17.77
7	180	5.96	3.66	8.07	20.16
8	210	2.69	3.94	4.67	14.55
9	240	7.20	4.30	5.14	5.24
10	270	6.75	29.84	27.68	1.11
11	300	28.27	33.32	35.56	15.88
12	330	24.44	27.34	36.45	26.38
-	Total	13.73	18.69	23.72	20.68

5.3.3. Comparação de índices RIX

De forma a comparar os resultados foi calculado o desvio entre os resultados da ferramenta desenvolvida e os resultados pelo WAsP map editor.

$$Desvio = RIX_{GUI,s} - RIX_{WAsP,s} \quad [5.2]$$

Equação 5.2. - Cálculo do desvio entre os resultados da ferramenta e do programa WAsP.

Calculou-se o desvio entre as duas ferramentas segundo a Equação 5.2, onde $RIX_{GUI,s}$ corresponde aos valores de RIX por setor apresentados na Tabela 5.23 e $RIX_{WAsP,s}$ corresponde aos valores de RIX por setor apresentados na Tabela 5.24, o *Desvio* corresponde à diferença entre estes pares de RIX que se encontram apresentados na Tabela 5.25.

Tabela 5.25. - Resultados da comparação por setor e total do RIX obtido pela ferramenta desenvolvida e WAsP map editor.

Número de sector	Direção [°]	Desvio GUI-WAsP			
		A	B	C	D
1	0	-2.10%	-8.13%	-5.82%	-7.11%
2	30	4.05%	1.07%	-1.37%	0.53%
3	60	-3.48%	-3.47%	-4.15%	-5.86%
4	90	-2.75%	-18.00%	-8.14%	-28.39%
5	120	0.25%	-1.11%	-1.43%	-1.10%
6	150	1.80%	-0.54%	-2.01%	3.31%
7	180	-2.26%	-1.10%	-5.79%	-5.06%
8	210	2.44%	7.74%	-1.82%	-2.58%
9	240	-1.22%	3.11%	3.12%	-3.25%
10	270	1.80%	8.05%	15.06%	-0.54%
11	300	-0.35%	0.01%	-2.23%	6.91%
12	330	0.63%	0.58%	-11.38%	-6.44%
-	Total	0.19%	0.01%	-1.92%	-2.28%

Analisando a Tabela 5.25 verificou-se que para as estações A e B o desvio total é muito baixo indicando que a ferramenta representou o índice RIX de forma correcta. No entanto não deixam de existir diferenças por setor, por exemplo na estação B setor 4 verificou-se uma diferença de -18%, o valor negativo indica que o RIX calculado na ferramenta foi menor que o RIX obtido no WAsP. Para as estações C e D, o desvio total foi superior com uma diferença de $\pm 2\%$. Na estação C verificou-se várias instâncias de subavaliação do valor RIX por setor com as exceções dos setores 9 e 10 onde este sobreavaliou o valor do índice RIX em 3.12% e 15.06%, respetivamente. Na estação D também se verificou vários conjuntos de valores negativos indicando subavaliação da ferramenta perante a ferramenta WAsP map editor com as exceções nos setores 2, 6 e 11 onde este sobreavaliou o valor do índice RIX em 0.53%, 3.31% e 6.91%. Como referido anteriormente, na análise do índice RIX efetuado pela ferramenta verificou-se para a estação C para os setores 1 e 4 não foi possível calcular o valor de RIX por ultrapassar os limites do mapa, ambos estes setores subavaliaram o valor de RIX e esta diferença provavelmente deve-se a esta limitação. O mesmo aconteceu na estação D para os setores 3, 4 e 5 onde a maior diferença foi no setor 4 onde a diferença foi de -28.39%.

5.4. Síntese dos resultados obtidos

Para dois casos de estudo foram avaliados vários parâmetros relevantes para avaliação do potencial eólico e para a compreensão e aplicação do método de compósito multi-estação. Apenas para o caso de estudo da Serra do Perdigão é que foi aplicada toda a metodologia descrita, devido a falta de dados não foi possível aplicar na totalidade da metodologia para o caso de estudo da Serra da Freita. Foram elaboradas as seguintes análises: comparação do método de compósito multi-estação com mapas de recursos obtidos de programas diferentes, nomeadamente mapas de recursos do *WAsP* e do *WindSim*, a acrescer também foi comparado o compósito multi-estação gerado nativamente pelo *WindSim*; comparação das distâncias a serem aplicadas no método do inverso da distância de forma a identificar qual das seguintes é mais relevante para a aplicação do método: Euclidiana a duas dimensões, Euclidiana a três dimensões, Chebychev, Manhattan e Minkowsky; estudo de comparação de grelhas de recursos obtidas através de um modelo linear (*WAsP*) e um modelo não-linear (*WindSim*).

Também foi realizada uma validação do cálculo do indicador RIX na ferramenta desenvolvida. Para fim das conclusões deste trabalho pode-se apenas referir que os resultados do cálculo do RIX na aplicação desenvolvida em comparação com os resultados gerados pelo *WAsP* a diferença máxima foi de -2,28%, considerando assim validado o cálculo do RIX na ferramenta.

Análise do caso de estudo da Serra do Perdigão:

Relativamente aos parâmetros na avaliação do potencial eólico, procurou-se encontrar relações da distância, altitude, diferença de altitude, velocidade e indicador RIX com o viés obtido, por comparação entre a estimativa da grelha de recurso eólico e valor médio observado de cada estação. As grelhas de recurso obtidas são provenientes do processamento das observações das estações anemométricas pelo programa *WAsP*. Em primeiro lugar analisando o efeito da distância com o viés (Figura 5.3) não se verifica qualquer tipo de relação, questionando assim a aplicação do método do inverso da distância, que por sua vez implicaria que quanto mais próximo o ponto da estimativa estiver do ponto de observação menor seria o erro.

Através da Tabela 5.4 foram retiradas algumas observações que levaram ao estudo da altitude e diferença de altitude com o viés. Considerando a Figura 5.4 observam-se algumas tendências no comportamento do viés relativamente à diferença de altitude entre o ponto estimado e o ponto observado. Quando a diferença de altitude é negativa (indicado que a estimativa é obtida por uma estação anemométrica a uma altitude superior) a magnitude do erro é menor e o viés tende a ser positivo, quando a diferença de altitude é mínima o viés tende a ser próximo de 0 m/s, quando a diferença de altitude é positiva (ao seja, o ponto estimado é proveniente das observações de uma estação a uma altitude inferior) a magnitude do erro é maior e embora exista uma maior concentração de viés com valores menores que zero a dispersão é muito grande para tirar alguma conclusão.

Reforçando a observação que uma diferença de altitude negativa tende a ter um viés positivo, analisando a Figura 5.6 verifica-se que mais de 75% da amostra das estimativas das localizações a altitudes inferiores têm um viés positivo. No entanto, analisando a mesma figura verifica-se que mais de 50% da amostra das estimativas nas localizações a altitudes superiores são negativas assim como as suas medianas, exceto para o ponto localizado na estação rne07. Isto poderá dever-se ao facto de as estações semelhantes a rne07 (estações no topo da cumeada) terem todas sobre avaliado o potencial eólico para este ponto (Tabela 5.26, Tabela 5.28, Tabela 5.29 e Tabela 5.30), onde para a estação rne07 as estimativas provenientes das restantes estações na cumeada, rne02, rsw03, rsw06 e rsw07, têm um viés de 0.337, 0.360, 0.378 e 0.301 m/s, e um erro normalizado de 9.10%, 8.70%, 9.17% e 7.28%,

respetivamente. Os valores apresentados são elevados quando comparados com os restantes resultados. Por exemplo, através do mapa de recurso gerado pelos dados estação rsw06 o maior viés e erro normalizado, sem ser para a estação rne07, é de 0.153 m/s e 3.86% para a estação rne02. Por outro lado a melhor estimativa é obtida pela estação rne02 quando esta estima a velocidade do vento para o local da estação rsw06 obtendo um viés de 0.021 m/s e um erro normalizado de 0.47%.

Independentemente das observações anteriores com a Figura 5.5 onde se pode observar a linha envolvente dos viés para cada altitude, convexo de Hull, ilustrando que para as altitudes inferiores existe uma amplitude de viés menor e à medida que a altitude aumenta também aumenta a amplitude do viés. Nesta figura verifica-se que o WASP tende a sob avaliar o potencial eólico quando se tem uma estação anemométrica a uma altitude inferior à do ponto de interesse, principalmente estimando para a cumeada. Portanto se analisarmos as tabelas das estações que se encontram na encosta (Tabela 5.31 referente à estação tnw01, Tabela 5.33 referente à estação tnw10, Tabela 5.34 referente à estação tse06, Tabela 5.35 referente à estação tse08 e Tabela 5.36 referente à estação tse01) verifica-se este fenómeno de sob avaliação.

Tabela 5.26 - Tabelas de análise de erro individual para estação rne02

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rne02	rne02	3.96	4.060	0.100	0.010	2.53%
	rne07	4.14	4.517	0.377	0.142	9.10%
	rsw03	4.23	4.259	0.029	0.001	0.68%
	rsw06	4.49	4.511	0.021	0.000	0.47%
	rsw07	4.51	4.629	0.119	0.014	2.63%
	tnw01	1.97	2.561	0.591	0.349	29.98%
	tnw07	1.93	2.408	0.478	0.228	24.74%
	tnw10	2.41	3.626	1.216	1.478	50.45%
	tse06	2.27	2.997	0.727	0.529	32.05%
	tse08	1.98	2.636	0.656	0.430	33.14%
	tse011	1.76	2.760	1.000	1.000	56.83%

Tabela 5.27 - Tabela de análise de erro individual para a estação rne07.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rne07	rne02	3.96	3.850	-0.110	0.012	2.77%
	rne07	4.14	4.217	0.077	0.006	1.87%
	rsw03	4.23	4.030	-0.200	0.040	4.72%
	rsw06	4.49	4.251	-0.239	0.057	5.32%
	rsw07	4.51	4.354	-0.156	0.024	3.47%
	tnw01	1.97	2.224	0.254	0.064	12.88%
	tnw07	1.93	1.982	0.052	0.003	2.67%
	tnw10	2.41	3.385	0.975	0.951	40.47%
	tse06	2.27	2.673	0.403	0.162	17.73%
	tse08	1.98	2.321	0.341	0.116	17.20%
	tse011	1.76	2.419	0.659	0.435	37.45%

Tabela 5.28 – Tabela de análise de erro individual para a estação rsw03.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw03	rne02	3.96	4.093	0.133	0.018	3.35%
	rne07	4.14	4.500	0.360	0.130	8.70%
	rsw03	4.23	4.324	0.094	0.009	2.23%
	rsw06	4.49	4.522	0.032	0.001	0.72%
	rsw07	4.51	4.638	0.128	0.016	2.83%
	tnw01	1.97	2.301	0.331	0.109	16.79%
	tnw07	1.93	2.077	0.147	0.022	7.62%
	tnw10	2.41	3.592	1.182	1.396	49.03%
	tse06	2.27	2.776	0.506	0.256	22.30%
	tse08	1.98	2.369	0.389	0.151	19.63%
	tse011	1.76	2.515	0.755	0.570	42.92%

Tabela 5.29. – Tabela de análise de erro individual para a estação rsw06.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw06	rne02	3.96	4.113	0.153	0.023	3.86%
	rne07	4.14	4.519	0.379	0.144	9.17%
	rsw03	4.23	4.326	0.096	0.009	2.28%
	rsw06	4.49	4.546	0.056	0.003	1.24%
	rsw07	4.51	4.658	0.148	0.022	3.27%
	tnw01	1.97	2.356	0.386	0.149	19.58%
	tnw07	1.93	2.122	0.192	0.037	9.95%
	tnw10	2.41	3.612	1.202	1.445	49.88%
	tse06	2.27	2.831	0.561	0.314	24.70%
	tse08	1.98	2.440	0.460	0.212	23.26%
	tse011	1.76	2.570	0.810	0.656	46.03%

Tabela 5.30. – Tabela de análise de erro individual para a estação rsw07.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw07	rne02	3.96	4.047	0.087	0.008	2.19%
	rne07	4.14	4.441	0.301	0.091	7.28%
	rsw03	4.23	4.266	0.036	0.001	0.84%
	rsw06	4.49	4.468	-0.022	0.000	0.48%
	rsw07	4.51	4.573	0.063	0.004	1.40%
	tnw01	1.97	2.289	0.319	0.102	16.18%
	tnw07	1.93	2.056	0.126	0.016	6.52%
	tnw10	2.41	3.551	1.141	1.302	47.34%
	tse06	2.27	2.763	0.493	0.243	21.72%
	tse08	1.98	2.371	0.391	0.153	19.73%
	tse011	1.76	2.503	0.743	0.553	42.24%

Tabela 5.31. – Tabela de análise de erro individual para a estação tnw01.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tnw01	rne02	3.96	3.753	-0.207	0.043	5.22%
	rne07	4.14	4.111	-0.029	0.001	0.71%
	rsw03	4.23	3.989	-0.241	0.058	5.69%
	rsw06	4.49	4.148	-0.342	0.117	7.62%
	rsw07	4.51	4.260	-0.250	0.063	5.55%
	tnw01	1.97	2.039	0.069	0.005	3.49%
	tnw07	1.93	1.773	-0.157	0.025	8.13%
	tnw10	2.41	3.281	0.871	0.759	36.14%
	tse06	2.27	2.466	0.196	0.038	8.62%
	tse08	1.98	2.112	0.132	0.017	6.67%
	tse011	1.76	2.228	0.468	0.219	26.59%

Tabela 5.32. – Tabela de análise de erro individual para a estação tnw07.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tnw07	rne02	3.96	4.668	0.708	0.501	17.87%
	rne07	4.14	5.054	0.914	0.836	22.08%
	rsw03	4.23	4.911	0.681	0.464	16.10%
	rsw06	4.49	5.122	0.632	0.400	14.08%
	rsw07	4.51	5.241	0.731	0.534	16.20%
	tnw01	1.97	2.453	0.483	0.233	24.50%
	tnw07	1.93	2.051	0.121	0.015	6.26%
	tnw10	2.41	4.039	1.629	2.653	67.58%
	tse06	2.27	3.024	0.754	0.569	33.23%
	tse08	1.98	2.588	0.608	0.370	30.72%
	tse011	1.76	2.706	0.946	0.895	53.75%

Tabela 5.33 – Tabela de análise de erro individual para a estação tnw10.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tnw10	rne02	3.96	2.756	-1.204	1.449	30.40%
	rne07	4.14	3.104	-1.036	1.072	25.01%
	rsw03	4.23	2.911	-1.319	1.740	31.18%
	rsw06	4.49	3.082	-1.408	1.983	31.36%
	rsw07	4.51	3.167	-1.343	1.805	29.79%
	tnw01	1.97	1.853	-0.117	0.014	5.95%
	tnw07	1.93	1.809	-0.121	0.015	6.29%
	tnw10	2.41	2.480	0.070	0.005	2.92%
	tse06	2.27	2.116	-0.154	0.024	6.78%
	tse08	1.98	1.857	-0.123	0.015	6.19%
	tse011	1.76	1.973	0.213	0.045	12.11%

Tabela 5.34. – Tabela de análise de erro individual para a estação tse06.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse06	rne02	3.96	3.242	-0.718	0.516	18.14%
	rne07	4.14	3.567	-0.573	0.328	13.83%
	rsw03	4.23	3.394	-0.836	0.698	19.75%
	rsw06	4.49	3.584	-0.906	0.821	20.18%
	rsw07	4.51	3.660	-0.850	0.723	18.85%
	tnw01	1.97	1.923	-0.047	0.002	2.39%
	tnw07	1.93	1.717	-0.213	0.045	11.01%
	tnw10	2.41	2.856	0.446	0.199	18.51%
	tse06	2.27	2.308	0.038	0.001	1.69%
	tse08	1.98	1.985	0.005	0.000	0.24%
	tse011	1.76	2.074	0.314	0.099	17.84%

Tabela 5.35 – Tabela de análise de erro individual para a estação tse08.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08	rne02	3.96	3.199	-0.761	0.579	19.22%
	rne07	4.14	3.582	-0.558	0.311	13.47%
	rsw03	4.23	3.387	-0.843	0.711	19.94%
	rsw06	4.49	3.566	-0.924	0.854	20.58%
	rsw07	4.51	3.655	-0.855	0.731	18.96%
	tnw01	1.97	2.048	0.078	0.006	3.96%
	tnw07	1.93	1.965	0.035	0.001	1.82%
	tnw10	2.41	2.859	0.449	0.202	18.63%
	tse06	2.27	2.387	0.117	0.014	5.14%
	tse08	1.98	2.061	0.081	0.007	4.10%
	tse011	1.76	2.186	0.426	0.181	24.20%

Tabela 5.36. – Tabela de análise de erro individual para a estação tse11.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse11	rne02	3.96	2.621	-1.339	1.794	33.82%
	rne07	4.14	2.913	-1.227	1.506	29.64%
	rsw03	4.23	2.753	-1.477	2.182	34.92%
	rsw06	4.49	2.913	-1.577	2.487	35.12%
	rsw07	4.51	2.989	-1.521	2.314	33.73%
	tnw01	1.97	1.663	-0.307	0.094	15.56%
	tnw07	1.93	1.559	-0.371	0.138	19.22%
	tnw10	2.41	2.333	-0.077	0.006	3.18%
	tse06	2.27	1.927	-0.343	0.117	15.10%
	tse08	1.98	1.709	-0.271	0.073	13.68%
	tse011	1.76	1.794	0.034	0.001	1.96%

Tendo em conta a premissa que com o aumento da altitude existe um aumento da velocidade, tal como indica a “lei de potências” [41], analisou-se esta relação através da comparação do viés com a

diferença de velocidade e diferença de altitude entre o valor da estimativa e o ponto de observação, esta comparação encontra-se na Figura 5.8. Analisando a figura verifica-se a clara relação das 3 variáveis, verifica-se que para uma diferença de velocidade negativa existe uma sobre estimativa da velocidade (viés positivo), para uma diferença de velocidade perto de 0 m/s verifica-se um viés mais próximo de 0 m/s e por fim, para uma diferença de velocidade positiva verifica-se uma sob estimativa da velocidade (viés negativa). Para este ultimo caso existem 5 amostras que não tem este comportamento, estas estimativas são provenientes da grelha de recurso obtida através das observações da estação tnw07 (Tabela 5.32) a diferença desta estação para as restantes que não estão na cumeada é que esta encontra-se no meio do vale no ponto mais baixo. Não tendo analisado mais estações que se encontravam no vale é difícil tirar conclusões sobre esta situação. No entanto num esforço para tentar diferenciar as estações que estão na encosta, no vale e na cumeada fez-se um perfil diário para cada estação e pode ser analisado na Figura 5.9. Embora semelhantes, apenas se verificam dois regimes de vento distintos na análise do perfil diário, onde claramente existe uma diferença de ± 2 m/s a separar os dois regimes de vento. Verifica-se que o regime de vento com maior intensidade é o regime composto pelas estações rne02, rne07, tsw03, rsw05 e rsw07, correspondente às estações que estão na cumeada e o regime com menor intensidade às estações restantes que não se encontram na cumeada.

Análise do caso de estudo da Serra da Freita

Para o segundo caso de estudo da Serra da Freita os resultados dentro do possível são concordantes, no entanto não é possível retirar tantas observações pois as séries de dados são limitantes em comparação com o primeiro caso de estudo. Além disso as quatro estações anemométricas encontram-se todas em condições semelhantes. No entanto é possível retirar algumas observações diferentes na avaliação do indicador ΔRIX . Os resultados parecem explicar a grande diferença entre a estação A e as restantes, facto que também foi verificada no estudo elaborado em [9]. A grelha de recurso obtida pela estação A é a que mais sobrestima o recurso eólico. Tal pode ser devido a uma separação de fluxo que poderá estar a ocorrer em A. Na avaliação de ΔRIX verifica-se que os valores são maiores para esta estação o que por sua vez poderá ser indicador de separação de fluxo tal como os autores indicam em [36].

Da aplicação do método de compósito multi-estação analisaram-se três metodologias onde, através das mesmas cinco estações (rsw06, rsw07, rne07, tse08 e tse11), obtiveram-se três compósitos multi-estação diferentes. Um dos métodos para obter o compósito multi-estação foi através das grelhas de recurso obtidas através do modelo linear do programa *WAsP* e estas foram processadas na ferramenta desenvolvida (*WAsPMultiComp*), outro foi através das grelhas de recurso obtidas através do modelo *CFD* do *WindSim* e após processadas na ferramenta desenvolvida (*WindSimMultiComp*), por fim o ultimo compósito foi obtido através do *WindSim* que aplica um metodologia multi-estação semelhante ao da ferramenta desenvolvida (*WindSimComp*). Com uma análise de erro, e análise de regressão linear verifica-se que dos três compósitos a melhor metodologia é obter as grelhas de recurso através do *WindSim*, e após, processá-las na ferramenta desenvolvida – concluindo que dos três processos de obtenção do compósito o processo II é o melhor processo. Ao seja, para a aplicação do método o fator mais importante são as próprias grelhas de recurso que são utilizadas no compósito. Os métodos não lineares ao longo da literatura mostram, geralmente, resultados melhores em terrenos de orografia complexa do que os métodos tradicionais. A regressão linear destes compósitos mostra também maior correlação, r^2 , para qualquer dos compósito obtidos através do *WindSim*. Esperar-se-ia ao menos que pela aplicação da metodologia da ferramenta o compósito obtido através das grelhas de recurso provenientes do *WAsP* o erro diminui-se mas como se pode observar pela Tabela 5.9, comparando o compósito *WAsPMultiComp* com a estação rne07 (estação com menor erro absoluto e normalizado das estações que perfazem o compósito) tal não acontece.

De forma a tentar melhorar o método de compósito multi-estação tentou-se modificar a distância utilizada no método do inverso da distância com uma variada combinação de compósitos. As distâncias estudadas foram Euclidiana, Chebychev, Manhattan e Minkowsky com variação do indicador p igual a 0.5, 1.5 e 4. Os resultados são claros onde não favorecem nenhuma distância em concreto.

Por fim foi feita uma análise das várias grelhas de recurso obtidas através do programa *WAsP* e *WindSim*. Comparando os resultados das grelhas de recurso provenientes do *WAsP* (Tabela 5.14) aos resultados provenientes do *WindSim* (Tabela 5.16) verifica-se que o desempenho varia bastante de estação para estação. O *WindSim* claramente avalia melhor o potencial eólico com os dados das estações que se encontram na cumeada, no entanto com as estações da encosta e do vale o *WindSim* obtém resultados muito insatisfatórios, por exemplo para a estação que se encontra no vale (tnw07) a grelha de recurso proveniente do *WindSim* tem um viés médio de 2.884 m/s e um erro médio normalizado de 82.54% onde a grelha de recurso obtida pelo *WAsP* tem um viés menor de 0.809 m/s e um erro normalizado de 29.61%. Tal poderá ter sucedido por vários fatores, entre eles, a aplicação da lei das potências, elevada complexidade do terreno, o alisamento considerado no programa assim como a localização da estação anemométrica. Curiosamente as grelhas de recurso provenientes da estação tnw07 são ambas as piores para os dois modelos. Resumindo com dados de estações no topo de montanhas o *WindSim* avaliou melhor o potencial eólico, para dados provenientes de estações na encosta o *WAsP* apresenta melhores resultados, não que sejam satisfatórios pois os erros normalizados continuam a ser muito elevados. Outra razão pela qual os valores de erros poderão ser tão elevados poderá ser devido ao método de interpolação entre os 4 pontos mais próximos na grelha de recurso do ponto de interesse, este tipo de método de interpolação tende a privilegiar o surgimento de fontes e sumidouros no campo interpolado em particular, para locais, cujas coordenadas não são coincidentes com as coordenadas da grelha de recurso.

6. Conclusões

Atendendo aos objetivos desta dissertação, foram estudadas diferentes distâncias, nomeadamente Euclidiana a duas dimensões e três, Manhattan, Chebychev e Minkowsky, para tentar encontrar a distância que mais favorece os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida pelo LNEG. Como discutido na síntese de resultados a aplicação de diferentes distâncias não obteve resultados satisfatórios, não realçando nenhuma distância em questão. No entanto através da análise de resultados pode-se apresentar algumas sugestões para desenvolvimento e aplicação do método, assim como algumas indicações para a instalação de estações anemométricas.

De acordo com os resultados obtidos pela análise de dados dos dois casos de estudo, a instalação das estações anemométricas deverão ser no topo de montanhas pois os viés obtidos para estas estações são menores. De seguida, os dados das estações deverão ser processados por um modelo não linear para obtenção das grelhas de recurso. Isto porque o compósito com menor erro foi o WindSimMultiComp. Este compósito foi obtido com as grelhas de recurso geradas pelo *WindSim* e depois processadas na ferramenta desenvolvida obtendo um erro absoluto médio de 0.225 m/s. Verificou-se que a metodologia multi-estação desenvolvida pelo LNEG obteve melhores resultados face ao método multi-estação nativo do *WindSim*, com um erro absoluto médio de 0.417 m/s.

Na comparação das grelhas de recurso obtidas pelo modelo linear e o modelo não linear verificou-se alguns resultados surpreendentes, principalmente o caso da estação tnw07 que se encontrava no meio do vale. O WindSim embora fosse um modelo não linear com maior poder computacional obteve erros muito elevados em comparação com o WAsP. Isto pode ser devido a parametrizações do WindSim que não eram as ideais para o processamento das observações da estação em questão.

A ferramenta desenvolvida mostrou ser uma mais valia para a aplicação do método e mapeamento do recurso eólico. Todos os compósitos analisados foram obtidos através da ferramenta com a exceção do compósito multi-estação gerado pelo *WindSim*. Além do mapeamento da velocidade, a ferramenta também permite o mapeamento de outras propriedades como o potencial eólico, fator de escala e fator de forma. Também permite fazer o mapeamento dos pontos de influência das várias estações de forma a analisar qual estação tem maior peso sobre uma determinada região quando é aplicado o método através da ferramenta. A ferramenta também tem uma visualização do RIX a duas e três dimensões para ajudar na compreensão dos resultados obtidos.

Uma limitação na aplicação da metodologia e na análise de dados foram as baixas velocidades do vento registadas. Este facto faz com que na análise do erro normalizado para as diferentes estações parecer ser muito elevado. Por exemplo, se a velocidade média observada é de 2 m/s, um erro absoluto de 0.5 m/s corresponde a um erro normalizado de 25%. No entanto, numa estação com uma velocidade média de 4 m/s o erro normalizado para o mesmo desvio de 0.5 m/s já seria de 12.50%.

Relativamente ao método em desenvolvido pelo LNEG, como verificado na análise de dados de ambos os casos de estudo, não existe nenhuma relação entre o viés e a distância. Por exemplo, seria apropriado aplicar um método com outro parâmetro que tenha maior relevância em vez da distância, nomeadamente a altitude ou outro parâmetro que seja indicador de semelhança entre estações anemométricas pois também se verificou que as grelhas de recursos avaliam melhor o potencial eólico para locais com condições semelhantes.

Para trabalhos futuros neste tema seria o desenvolvimento do método com a aplicação do inverso da distância mas em vez de utilizar a distância entre estações utilizar a diferença de altitude entre a estação e o ponto de observação, ao seja, se existirem duas grelhas de recurso para calcular a estimativa num ponto com base nas duas grelhas iria-se atribuir maior peso à grelha de recurso com a menor

diferença de altitude entre a altitude da estação de observação e a altitude do ponto de observação. Outro fator que seria interessante aplicar seria utilizar apenas as grelhas de recurso das estações que se encontram a cima da altitude do ponto de interesse, ao seja, tomemos o exemplo de existirem dados provenientes de três estações a 500 m 1000 m e 900 m de altitude, se quiséssemos estimar um ponto à altitude dos 700 m apenas ter-se-ia em consideração os dados das estações a 1000 m e 900 m. Os dados utilizados do projeto NEWA mostraram ser uma mais valia nesta dissertação mas apenas foram utilizados dados provenientes de 11 estações a 20 m de altura. O projeto NEWA contém cerca de 50 mastros e alguns com vários postos de observações a alturas diferentes, seria interessante aplicar a metodologia desenvolvida no mesmo local mas com diferentes combinações de estações a alturas mais elevadas.

Bibliografia

- [1] DGEG, “Estatísticas Rápidas - nº 170,” DGEG, Lisboa, 2018.
- [2] World Wind Energy Association, [Online]. Available: <http://www.wwindea.org/2017-statistics>. [Acedido em 18 2 2018].
- [3] Global Wind Energy Council, [Online]. Available: <http://gwec.net/global-figures/graphs/>. [Acedido em 18 2 2018].
- [4] F. Pazheri, M. Othman e N. Malik, “A review on global renewable electricity scenario,” *Renewable Sustainable Energy Review*, vol. 31, pp. 835-845, 2014.
- [5] K. S. R. Murthy e O. P. Rahi, “A comprehensive review of wind resource assessment,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 1320-1342, 2017.
- [6] G. W. E. Council, “Global Wind Report – Annual Market Update,” 22 4 2015. [Online]. Available: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-. [Acedido em 17 2 2018].
- [7] H. P. Alfredsson e A. Segalini, “Wind farms in complex terrains: an introduction,” *Philosophical Transactions Royal Society*, vol. 375, 2017.
- [8] J. Mann, N. Angelou, J. Arnqvist, D. Callies, E. Cantero, R. C. Arroyo, M. Courtney, J. Cuxart, E. Dellwik, J. Gottschall, S. Ivanell, P. Kühn, G. Lea, J. C. Matos, J. M. L. M. Palma, L. Pauscher, A. Peña, J. S. Rodrigo e e. al., “Complex terrain experiments in the New European Wind Atlas,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 375, pp. 1-23, 2017.
- [9] P. Costa e A. Estanqueiro, “Complex Terrain Based On Multiple Anemometric,” em *European Wind Energy Conference*, 2003.
- [10] The Mathworks, Inc., “Matlab R2012b,” Massachusetts, 2012.
- [11] A. Estanqueiro e J. Rio, “A method for wind data gaps recovery in complex terrain,” INETI, DER, Lisboa, 2003.
- [12] “Wind Atlas Application and Analysis Program,” DTU, [Online]. Available: www.wasp.dk. [Acedido em 17 2 2018].
- [13] “WindSim,” [Online]. Available: <https://windsim.com/>. [Acedido em 17 2 2018].
- [14] “WindPro,” EMD, [Online]. Available: <https://www.emd.dk/windpro/>. [Acedido em 17 2 2018].
- [15] “WindFarmer,” DNVGL, [Online]. Available: <https://www.dnvgl.com/services/windfarmer-3766>. [Acedido em 17 2 2018].
- [16] I. Troen e E. Lundtang Petersen, *European Wind Atlas*, Roskilde: Risø National Laboratory, 1989.
- [17] I. Troen, “A high resolution model for flow in complex terrain,” em *AMS Ninth Symposium on Turbulence and Diffusion*, Roskilde, Denmark, 1990.
- [18] D. Cabezón, A. Iniesta, E. Ferrer e I. Martí, “Comparing linear and non linear wind flow,” em *EUROMECH Colloquium 464b: Wind Energy*, 2005.

- [19] A. Z. Dhunny, M. R. Lollchund e S. D. D. V. Rughooputh, “Wind energy evaluation for a highly complex terrain using Computational Fluid Dynamics (CFD),” *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 1-9, 2017.
- [20] B. W. Yan e Q. S. Li, “Coupled on-site measurement/CFD based approach for,” *Energy Conversion and Management*, vol. 117, pp. 351-356, 2016.
- [21] S. Houda, N. Zemmouri, A. Hasseine, R. Athmani e R. Belarbi, “CFD Model for Simulating Urban Flow in Complex”,,” *The Online Journal of Science and Technology*, vol. 2, pp. 1-10, 2012.
- [22] M. Ayala, J. Maldonado, E. Paccha e C. Riba, “Wind Power Resource Assessment in Complex Terrain: Villonaco Case-study Using Computational Fluid Dynamics Analysis,” *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 41 - 48, 2016.
- [23] Beaucage P, B. M. C. e T. J., “Evaluation of four numerical wind flow models for wind resource mapping,” *Wind Energy*, vol. 17, pp. 197-208, 2014.
- [24] F. A. Castro, J. M. L. M. Palma e A. Silva Lopes, “Simulation of the askervein flow. Part 1: Reynolds averaged navier-stokes equations (k - ϵ turbulence model),” *Boundary-*, vol. 107, pp. 501-530, 2003.
- [25] M. Balogh, A. Parente e C. Benocci, “RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced k- ϵ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vols. %1 de %2104-106, pp. 360-368, 2012.
- [26] A. Bechmann, J. Mann, J. Johansen, N. N. Sørensen e J. N. Sørensen, “Large-eddy simulation of atmospheric flow over complex terrain,” Risø.
- [27] J. M. L. Mattuella, A. M. Loredo-Souza, M. G. K. Oliveira e A. P. Petry, “Wind tunnel experimental analysis of a complex terrain micrositng”,,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 110-119, 2016.
- [28] “Windsim Module Description,” WindSim, [Online]. Available: https://www.windsim.com/ws_docs80/ModuleDescriptions/WindResources.html. [Acedido em 21 2 2018].
- [29] F. González-Longatt, H. Medina e J. S. González, “Spatial interpolation and orographic correction to estimate wind energy resource in Venezuela,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 1-16, 2015.
- [30] L. Pauscher, N. Vasiljevic, D. Callies, G. Lea, J. Mann, T. Klaas, J. Hieronimus, J. Gottschall , A. Schwesig, M. Kühn e M. Courtney, “An Inter-Comparison Study of Multi- and DBS Lidar Measurements in Complex Terrain,” *remote sensing*, vol. 8, nº 782, pp. 1-22, 2016.
- [31] V.-M. Kumer, J. Reuder e R. O. Eikill, “Characterization of Turbulence in Wind Turbine Wakes under Different Stability Conditions from Static Doppler LiDAR Measurements,” *remote sensing*, vol. 9, nº 242, pp. 1-20, 2016.
- [32] M. Khalid e A. V. Savkin, “A Method for Short-Term Wind Power Prediction With Multiple Observation Points,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 27, nº 2, pp. 579 - 586, 2012.

- [33] Y. HIRATA, D. P. MANDIC, H. SUZUKI e K. AIHARA, “Wind direction modelling using multiple observation points,” *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 366, pp. 591 - 607, 2008.
- [34] C. B. Hasager, A. Mouche, M. B. Christiansen, P. Astrup e M. Nielsen, “Satellite winds in EU-Norsewind,” em *EWEC*, Marseille, 2009.
- [35] M. Fernandes, P. Costa, T. Simões e A. Estanqueiro, “Using data assimilation in mesoscale numerical modeling to map offshore wind resource,” em *European Seminar OWEMES*, 2012.
- [36] J. M. L. M. P. N. A. J. C. M. R. M. G. L. J. M. M. C. L. F. R. e. V. M. M. G. C. G. Nikola Vasiljević, “Perdigão 2015: methodology for atmospheric multi-Doppler lidar experiments,” *Atmos. Meas. Tech.*, nº 10, pp. 3463-3483, 2017.
- [37] A. Bowen e N. Mortensen, “Exploring the limits of WASP: the Wind Atlas Analysis and Application Program,” em *Eur. Union Wind Energy Conf.*, 1996.
- [38] N. Wood, “The onset of separation in neutral, turbulent flow over hills,” *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 76, nº 1–2, p. 137–164, 1995.
- [39] R. Pereira, R. Guedes e C. Santos, “Comparing WASP and CFD wind resource estimates for the “regular” user,” em *Eur. Wind Energy Conf.*, 2010.
- [40] T. Wallbank, WindSim Validation Study: CFD validation in Complex terrain, 2008.
- [41] J. Manwell, J. McGowan e A. Rogers, “WIND ENERGY EXPLAINED,” em *WIND ENERGY EXPLAINED: Theory, Design and Application*, John Wiley and Sons, Ltd, 2009, pp. 24-28.
- [42] T. J. Wentink, “Study of Alaskan wind power and its possible applications,” Alaska Univ., College. Geophysical Inst., Alaska, 1976.
- [43] G. Justus, W. R. Hargraves e A. Yalcin, “Nationwide assessment of potential output from wind powered generators,” *Appl. Meteor*, vol. 15, pp. 673-678, 1976.
- [44] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Mikhail e D. Graber, “Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions,” *Journal of Applied Meteorology*, vol. 17, nº March 1978, pp. 350-353, 3 11 1977.
- [45] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins e E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [46] J. P. Hennessey, “Some Aspects os Wind Power Statistics,” *Applied Meteorology*, vol. 16, nº 2, pp. 119-128, 1977.
- [47] IEC 61400-1, Wind turbines - Part 1: Design requirements, 2006.
- [48] T. Mosetlthe, A. A. Yusuff e Y. Hamam, “Investigating seasonal wind energy potential in Vredendal , South Africa,” *J. energy South. Afr.*, vol. 29, nº 2, p. 77–83, 2018.
- [49] D. Villanueva e A. Feijóo, “Wind power distributions: A review of their applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, nº 5, pp. 1490-1495, 2010.
- [50] K. H. Bergey, “The Lanchester-Betz Limit,” *Journal of Energy*, vol. 3, nº 6, pp. 382-384, 1979.
- [51] E. Woschnagg e J. Cipun, “Evaluating Forecast Accuracy,” em *UK Ökonometrische Prognose*, Vienna, University of Vienna, 2004.

- [52] J. C. Suárez, B. A. Gardiner e C. P. Quine, “A comparison of three methods for predicting,” *Meteorol. Appl.*, nº 6, p. 329–342, 1999.
- [53] S. V. Ackere, G. V. Eetvelde, D. Schillebeeckx, E. Papa, K. V. Wyngene e L. Vandeveld, “Wind resource mapping using landscape roughness and spatial interpolation methods,” *Energies*, vol. 8, nº 8, p. 8682–8703, 2015.
- [54] N. Mortensen, A. Bowen e I. Antoniou, “Improving WAsP predictions in (too) complex terrain,” em *Proceedings (online)*, 2006.
- [55] N. G. Mortensen, A. J. Bowen e I. Antoniou, “IMPROVING WAsP PREDICTIONS IN (TOO) COMPLEX TERRAIN,” em *EWEC*, 2006.
- [56] N. G. Mortensen, A. Tindal e L. Landberg, “Field validation of the RIX performance indicator for flow in complex terrain.,” em *Wind Energy Conference and Exhibition.*, Bruxelas, 2008.
- [57] U. -. E. O. Laboratory, “UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory. 2017. NCAR/EOL Preliminary 5 minute ISFS data, geographic coordinate sonic winds, not tilt corrected. Version 0.2 [PRELIMINARY].,” 2017. [Online]. Available: <https://data.eol.ucar.edu/dataset/536.011>. [Acedido em 07 07 2018].
- [58] U. -. E. O. Laboratory., “UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory. 2017. NCAR/EOL Preliminary 5 minute ISFS data, instrument coordinates, not tilt corrected. Version 0.1 [PRELIMINARY].,” 2017. [Online]. Available: <https://data.eol.ucar.edu/dataset/536.011>. [Acedido em 07 07 2017].
- [59] e2p, “Parques Eólicos em Portugal,” INEGI, APREN, 2016.
- [60] “Guidelines For Wind Resource Assessment: Best Practices For Countries Initiating Wind Development,” 5 2014. [Online]. Available: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/42032/guidelines-wind-resource-assessment.pdf>. [Acedido em 18 2 2018].
- [61] A. K. W., “Computational modelling for wind energy assessment,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, p. 1571–1590, 2008.
- [62] V. B. S. Prasath, H. A. A. Alfeilat, O. Lasassmeh e A. B. A. Hassanat, “Distance and Similarity Measures Effect on the Performance of K-Nearest Neighbor Classifier - A Review,” pp. 1-50, 2017.
- [63] J. Tensen, M. C. Brower e P. Beaucage, “Evaluation of four numerical wind flow models for wind resource mapping,” em *AWEA WINDPOWER 2011*, 2012.
- [64] Direção Geral de Energia e Geologia, “Renováveis”.
- [65] A. Bechmann, “Perdigão CFD Grid Study,” Vindenergi, 2016.

Anexos

A.

A. Tabelas de análise de erro individual para caso de estudo 2

Anexo A.1. - Tabelas de análise de erro individual para estação A.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
A	A	6.63	6.959	0.329	0.108	4.96%
	B	6.70	8.066	1.366	1.866	20.39%
	C	6.55	7.797	1.247	1.554	19.03%
	D	6.38	7.357	0.977	0.955	15.32%

Anexo A.2. – Tabela de análise de erro individual para a estação B.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
B	A	6.63	6.078	-0.552	0.305	8.33%
	B	6.70	7.082	0.382	0.146	5.71%
	C	6.55	7.035	0.485	0.235	7.40%
	D	6.38	6.476	0.096	0.009	1.50%

Anexo A.3. – Tabela de análise de erro individual para a estação C.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
C	A	6.63	6.058	-0.572	0.327	8.62%
	B	6.70	6.978	0.278	0.077	4.15%
	C	6.55	6.823	0.273	0.075	4.17%
	D	6.38	6.356	-0.024	0.001	0.38%

Anexo A.4. – Tabela de análise de erro individual para a estação D.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
D	A	6.63	6.188	-0.442	0.195	6.66%
	B	6.70	7.212	0.512	0.262	7.64%
	C	6.55	7.054	0.504	0.254	7.70%
	D	6.38	6.584	0.204	0.042	3.20%

B. Tabelas de análise de erro individual para estudo de comparação entre compósitos.

Anexo B.1. – Tabela de análise de erro individual para o compósito WAsPMultiComp.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
WAsPMultiComp	rne02	3.960	3.084	-0.876	0.767	22.11%
	rsw03	4.230	3.539	-0.691	0.477	16.33%
	tnw01	1.970	2.750	0.780	0.609	39.61%
	tnw07	1.930	2.514	0.584	0.341	30.28%
	tnw10	2.410	3.144	0.734	0.539	30.46%
	tse06	2.270	2.754	0.484	0.234	21.32%

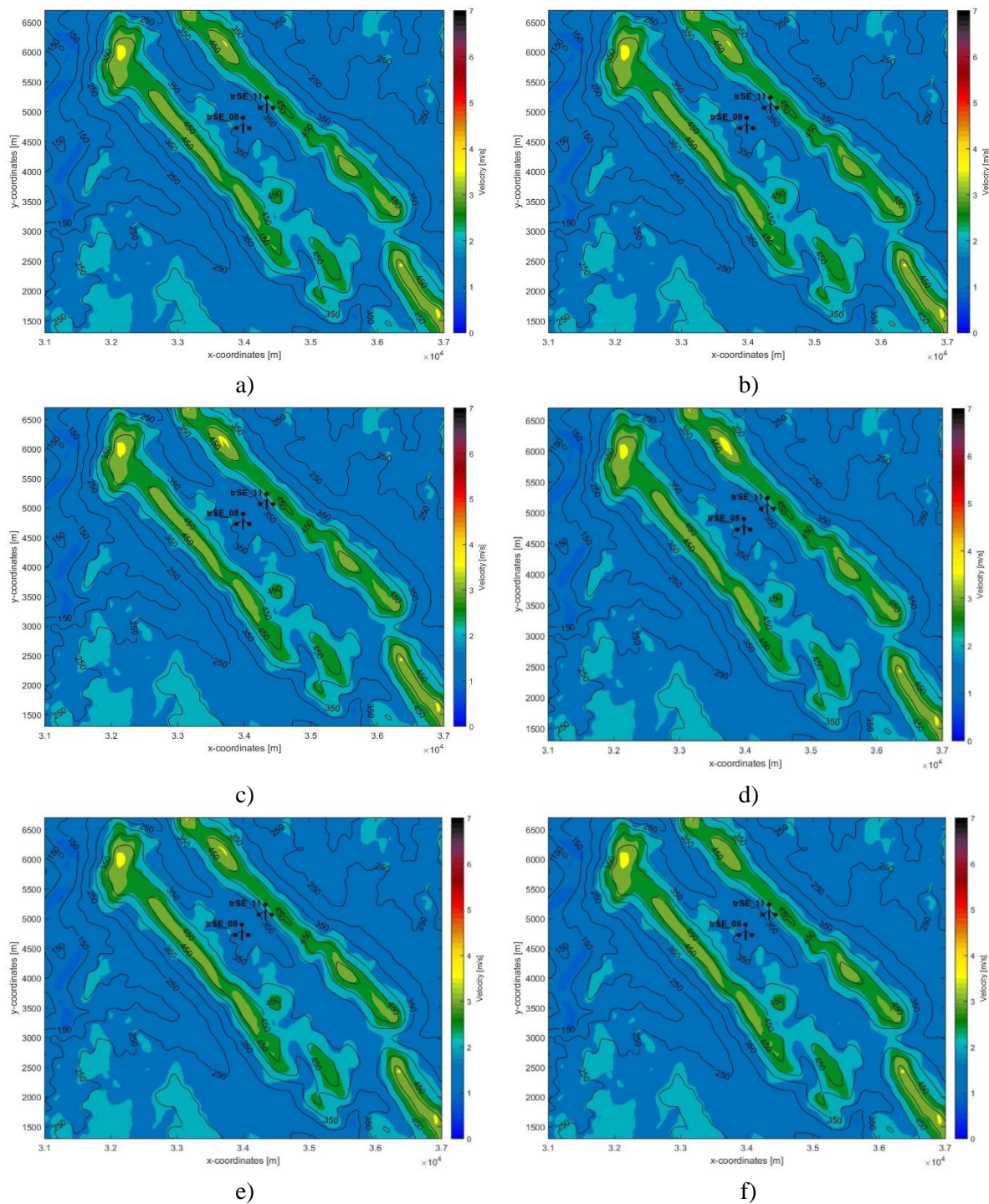
Anexo B.2. – Tabela de análise de erro individual para o compósito WindSimMultiComp.

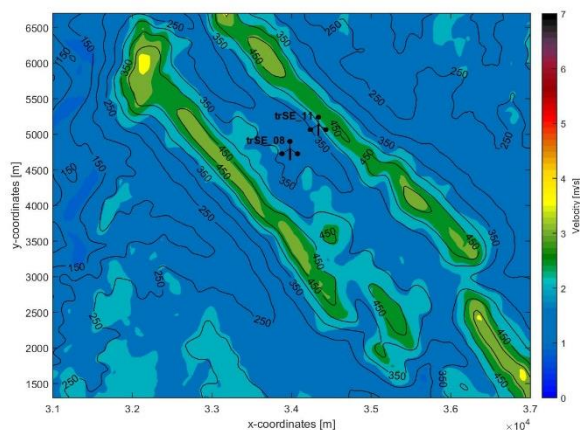
Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
WindSimMultiComp	rne02	3.960	3.906	-0.054	0.003	1.36%
	rsw03	4.230	4.078	-0.152	0.023	3.61%
	tnw01	1.970	1.821	-0.149	0.022	7.57%
	tnw07	1.930	1.721	-0.209	0.044	10.83%
	tnw10	2.410	3.009	0.599	0.358	24.84%
	tse06	2.270	2.086	-0.184	0.034	8.10%

Anexo B.3. – Tabela de análise de erro individual para o compósito WindSimComp.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
WindSimComp	rne02	3.960	4.459	0.499	0.249	12.60%
	rsw03	4.230	4.886	0.656	0.431	15.51%
	tnw01	1.970	1.985	0.015	0.000	0.74%
	tnw07	1.930	1.794	-0.136	0.018	7.02%
	tnw10	2.410	3.411	1.001	1.001	41.52%
	tse06	2.270	2.075	-0.195	0.038	8.61%

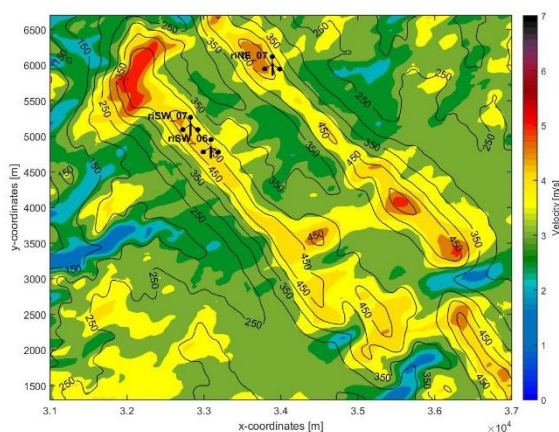
C. Mapas de recurso, tabelas de análise de erro individuais e regressões lineares para estudo de comparação de distâncias e compósitos



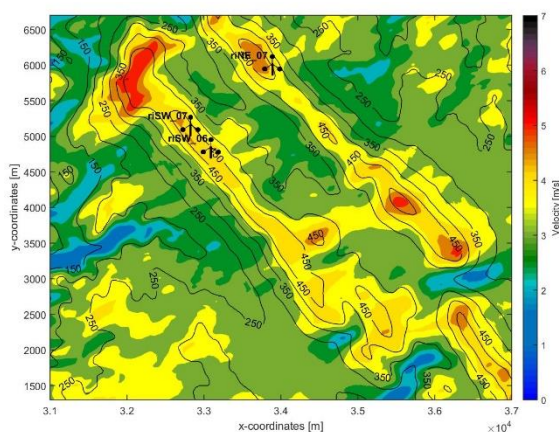


g)

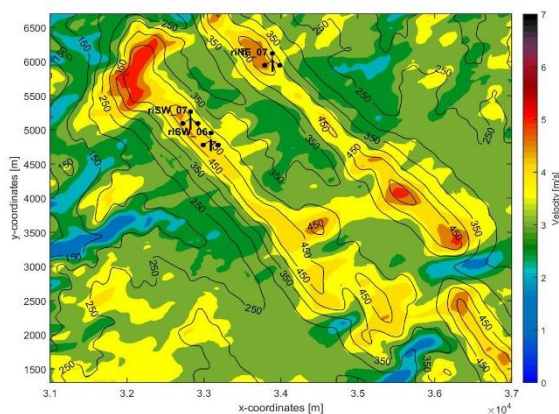
Anexo C.1. – Mapas de recurso obtidos do compósito gerado pelas estações tse08 e tse11 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.



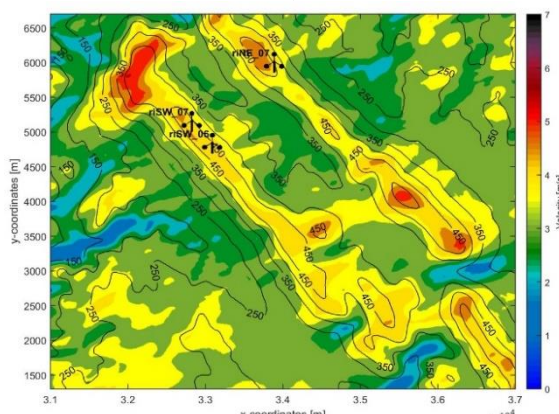
a)



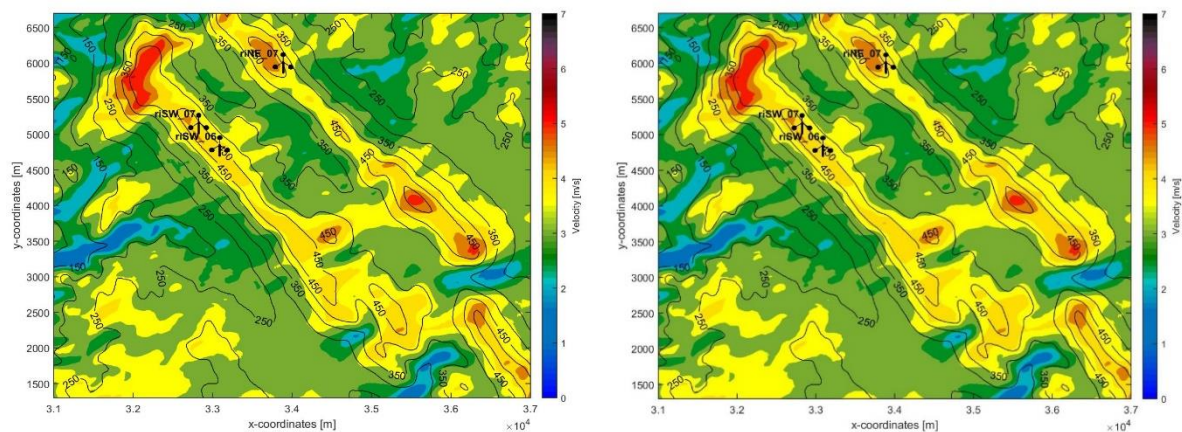
b)



c)

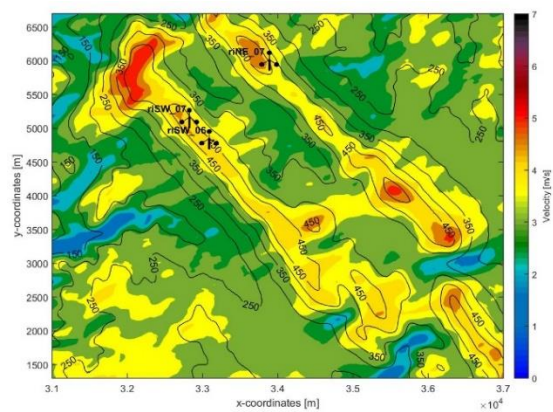


d)



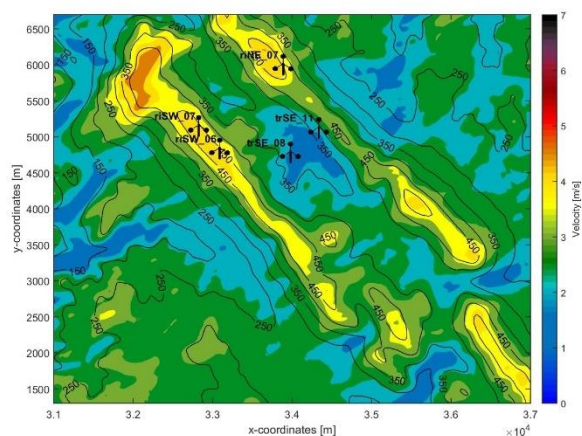
e)

f)

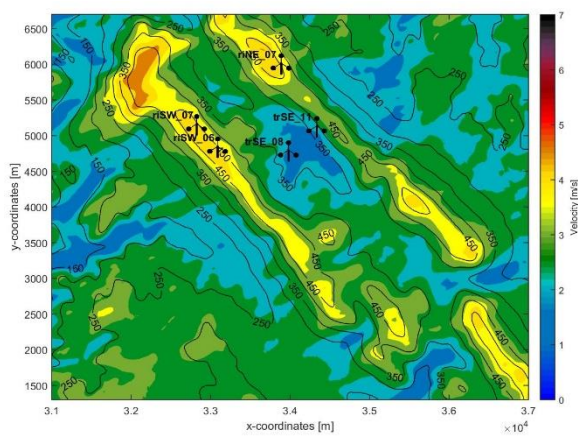


g)

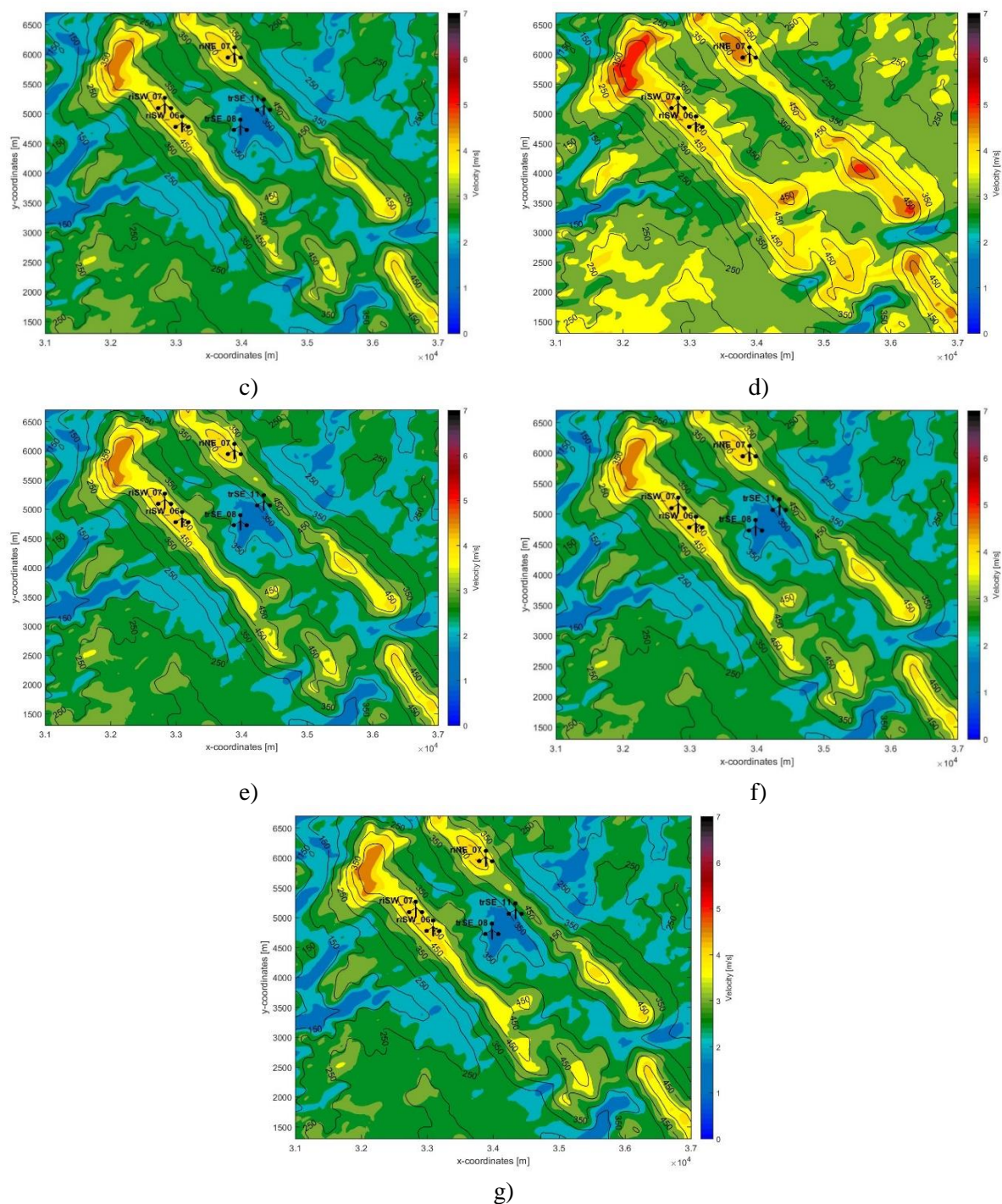
Anexo C.2. – Mapas de recurso obtidos do compósito gerado pelas estações rsw06, rsw07 e rne07 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.



a)



b)



Anexo C.3. – Mapas de recurso obtidos do compósito gerados pelas estações tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne07 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.

Anexo C.4. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Euclidiana.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	2.745	-1.215	1.476	30.68%
	rne07	4.140	3.138	-1.002	1.004	24.20%
	risw03	4.230	3.109	-1.121	1.258	26.51%
	rSW06	4.490	3.200	-1.290	1.663	28.72%
	rSW07	4.510	3.278	-1.232	1.517	27.31%
	trnw01	1.970	1.723	-0.247	0.061	12.54%
	trnw07	1.930	1.649	-0.281	0.079	14.54%
	trnw10	2.410	2.481	0.071	0.005	2.95%
	trSE06	2.270	2.095	-0.175	0.031	7.72%

Anexo C.5. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Euclidiana a três dimensões.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	2.745	-1.215	1.476	30.68%
	rne07	4.140	3.138	-1.002	1.004	24.20%
	risw03	4.230	3.109	-1.121	1.258	26.51%
	rSW06	4.490	3.200	-1.290	1.663	28.72%
	rSW07	4.510	3.271	-1.239	1.536	27.48%
	trnw01	1.970	1.723	-0.247	0.061	12.54%
	trnw07	1.930	1.649	-0.281	0.079	14.54%
	trnw10	2.410	2.481	0.071	0.005	2.95%
	trSE06	2.270	2.095	-0.175	0.031	7.73%

Anexo C.6. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Manhattan.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	2.741	-1.219	1.486	30.78%
	rne07	4.140	3.173	-0.967	0.935	23.36%
	risw03	4.230	3.109	-1.121	1.258	26.51%
	rSW06	4.490	3.220	-1.270	1.614	28.30%
	rSW07	4.510	3.241	-1.269	1.610	28.13%
	trnw01	1.970	1.739	-0.231	0.053	11.73%
	trnw07	1.930	1.649	-0.281	0.079	14.54%
	trnw10	2.410	2.518	0.108	0.012	4.49%
	trSE06	2.270	2.098	-0.172	0.029	7.56%

Anexo C.7. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Minkowsky com $p=0.5$.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	2.739	-1.221	1.491	30.83%
	rne07	4.140	3.208	-0.932	0.869	22.51%
	risw03	4.230	3.110	-1.120	1.254	26.47%
	rSW06	4.490	3.250	-1.240	1.538	27.62%
	rSW07	4.510	3.183	-1.327	1.761	29.43%
	trnw01	1.970	1.773	-0.197	0.039	10.02%
	trnw07	1.930	1.649	-0.281	0.079	14.56%
	trnw10	2.410	2.559	0.149	0.022	6.17%
	trSE06	2.270	2.104	-0.166	0.027	7.30%

Anexo C.8. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Minkowsky com $p=1.5$.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	2.745	-1.215	1.476	30.68%
	rne07	4.140	3.151	-0.989	0.977	23.88%
	risw03	4.230	3.109	-1.121	1.258	26.51%
	rSW06	4.490	3.207	-1.283	1.646	28.57%
	rSW07	4.510	3.270	-1.240	1.538	27.50%
	trnw01	1.970	1.729	-0.241	0.058	12.24%
	trnw07	1.930	1.649	-0.281	0.079	14.54%
	trnw10	2.410	2.491	0.081	0.007	3.36%
	trSE06	2.270	2.095	-0.175	0.031	7.72%

Anexo C.9. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Minkowsky com $p=4$.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	2.745	-1.215	1.476	30.68%
	rne07	4.140	3.124	-1.016	1.032	24.53%
	risw03	4.230	3.101	-1.129	1.276	26.70%
	rSW06	4.490	3.200	-1.290	1.665	28.74%
	rSW07	4.510	3.280	-1.230	1.513	27.27%
	trnw01	1.970	1.723	-0.247	0.061	12.55%
	trnw07	1.930	1.650	-0.280	0.079	14.53%
	trnw10	2.410	2.470	0.060	0.004	2.48%
	trSE06	2.270	2.089	-0.181	0.033	7.99%

Anexo C.10. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08 e tse11 obtido com a distância Chebyshev.

Estação	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	2.745	-1.215	1.476	30.68%
	rne07	4.140	3.119	-1.021	1.043	24.67%
	risw03	4.230	3.099	-1.131	1.280	26.74%
	rSW06	4.490	3.200	-1.290	1.665	28.74%
	rSW07	4.510	3.280	-1.230	1.513	27.27%
	trnw01	1.970	1.723	-0.247	0.061	12.55%
	trnw07	1.930	1.650	-0.280	0.079	14.53%
	trnw10	2.410	2.462	0.052	0.003	2.16%
	trSE06	2.270	2.085	-0.185	0.034	8.15%

Anexo C.11. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Euclidiana.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw06 rsw06 rne06	rne02	3.960	3.839	-0.121	0.015	3.06%
	risw03	4.230	3.976	-0.254	0.064	6.00%
	trnw01	1.970	3.022	1.052	1.107	53.41%
	trnw07	1.930	3.010	1.080	1.166	55.96%
	trnw10	2.410	3.429	1.019	1.038	42.28%
	trSE06	2.270	3.470	1.200	1.440	52.87%
	trSE08	1.980	3.143	1.163	1.354	58.76%
	trSE011	1.760	3.196	1.436	2.063	81.60%

Anexo C.12. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Euclidiana a três dimensões.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw06 rsw06 rne06	rne02	3.960	3.839	-0.121	0.015	3.06%
	risw03	4.230	3.976	-0.254	0.064	6.00%
	trnw01	1.970	3.022	1.052	1.107	53.40%
	trnw07	1.930	3.010	1.080	1.167	55.97%
	trnw10	2.410	3.430	1.020	1.040	42.32%
	trSE06	2.270	3.470	1.200	1.440	52.87%
	trSE08	1.980	3.143	1.163	1.354	58.76%
	trSE011	1.760	3.196	1.436	2.063	81.60%

Anexo C.13. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Manhattan.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw06 rsw06 rne06	rne02	3.960	3.862	-0.098	0.010	2.46%
	risw03	4.230	3.962	-0.268	0.072	6.34%
	trnw01	1.970	3.049	1.079	1.164	54.77%
	trnw07	1.930	3.001	1.071	1.148	55.52%
	trnw10	2.410	3.423	1.013	1.025	42.02%
	trSE06	2.270	3.472	1.202	1.445	52.95%
	trSE08	1.980	3.154	1.174	1.378	59.30%
	trSE011	1.760	3.182	1.422	2.023	80.82%

Anexo C.14. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=0.5$.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw06 rsw06 rne06	rne02	3.960	3.882	-0.078	0.006	1.96%
	risw03	4.230	3.951	-0.279	0.078	6.59%
	trnw01	1.970	3.074	1.104	1.219	56.04%
	trnw07	1.930	3.000	1.070	1.145	55.45%
	trnw10	2.410	3.418	1.008	1.017	41.84%
	trSE06	2.270	3.479	1.209	1.461	53.25%
	trSE08	1.980	3.174	1.194	1.426	60.32%
	trSE011	1.760	3.153	1.393	1.939	79.13%

Anexo C.15. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=1.5$.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw06 rsw06 rne06	rne02	3.960	3.848	-0.112	0.013	2.84%
	risw03	4.230	3.969	-0.261	0.068	6.16%
	trnw01	1.970	3.031	1.061	1.126	53.86%
	trnw07	1.930	3.009	1.079	1.164	55.89%
	trnw10	2.410	3.427	1.017	1.035	42.21%
	trSE06	2.270	3.470	1.200	1.440	52.87%
	trSE08	1.980	3.145	1.165	1.358	58.85%
	trSE011	1.760	3.196	1.436	2.063	81.61%

Anexo C.16. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=4$.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw06 rsw06 rne06	rne02	3.960	3.822	-0.138	0.019	3.47%
	risw03	4.230	3.985	-0.245	0.060	5.78%
	trnw01	1.970	3.004	1.034	1.070	52.50%
	trnw07	1.930	3.018	1.088	1.185	56.40%
	trnw10	2.410	3.438	1.028	1.056	42.65%
	trSE06	2.270	3.461	1.191	1.419	52.48%
	trSE08	1.980	3.136	1.156	1.337	58.40%
	trSE011	1.760	3.198	1.438	2.067	81.69%

Anexo C.17. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Chebyshev.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
rsw06 rsw06 rne06	rne02	3.960	3.813	-0.147	0.021	3.70%
	risw03	4.230	3.987	-0.243	0.059	5.74%
	trnw01	1.970	3.004	1.034	1.069	52.49%
	trnw07	1.930	3.026	1.096	1.201	56.77%
	trnw10	2.410	3.439	1.029	1.059	42.70%
	trSE06	2.270	3.461	1.191	1.419	52.48%
	trSE08	1.980	3.136	1.156	1.337	58.40%
	trSE011	1.760	3.198	1.438	2.067	81.69%

Anexo C.18. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Euclidiana.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11 rsw06 rsw07 rne07	rne02	3.960	3.084	-0.876	0.767	22.11%
	rsw03	4.230	3.539	-0.691	0.477	16.33%
	tnw01	1.970	2.750	0.780	0.609	39.61%
	tnw07	1.930	2.514	0.584	0.341	30.28%
	tnw10	2.410	3.144	0.734	0.539	30.46%
	tse06	2.270	2.754	0.484	0.234	21.32%

Anexo C.19. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Euclidiana a três dimensões.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	3.091	-0.869	0.756	21.95%
	rsw03	4.230	3.543	-0.687	0.472	16.24%
	rsw06	1.970	2.741	0.771	0.595	39.16%
	rsw07	1.930	2.506	0.576	0.331	29.83%
	rne07	2.410	3.144	0.734	0.539	30.46%
	tse06	2.270	2.752	0.482	0.232	21.22%

Anexo C.20. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Manhattan.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	3.096	-0.864	0.746	21.81%
	rsw03	4.230	3.543	-0.687	0.472	16.24%
	rsw06	1.970	2.742	0.772	0.596	39.20%
	rsw07	1.930	2.506	0.576	0.331	29.83%
	rne07	2.410	3.137	0.727	0.529	30.18%
	tse06	2.270	2.769	0.499	0.249	21.99%

Anexo C.21. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com p=0.5.

Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	3.124	-0.836	0.698	21.10%
	rsw03	4.230	3.544	-0.686	0.470	16.21%
	rsw06	1.970	2.700	0.730	0.533	37.05%
	rsw07	1.930	2.500	0.570	0.325	29.54%
	rne07	2.410	3.121	0.711	0.505	29.49%
	tse06	2.270	2.785	0.515	0.265	22.69%

Anexo C.22. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com p=1.5.

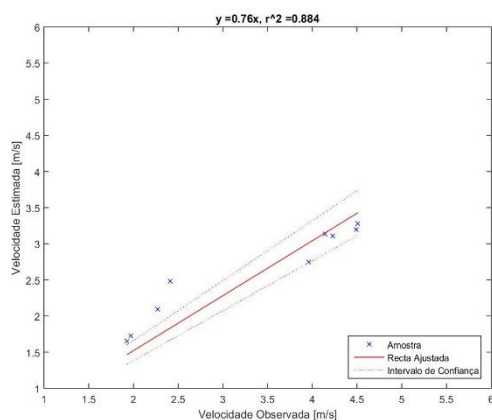
Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m ² /s ²]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	3.088	-0.872	0.760	22.02%
	rsw03	4.230	3.543	-0.687	0.473	16.25%
	rsw06	1.970	2.751	0.781	0.609	39.62%
	rsw07	1.930	2.509	0.579	0.335	29.98%
	rne07	2.410	3.144	0.734	0.539	30.46%
	tse06	2.270	2.761	0.491	0.241	21.61%

Anexo C.23. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Minkowsky com $p=4$.

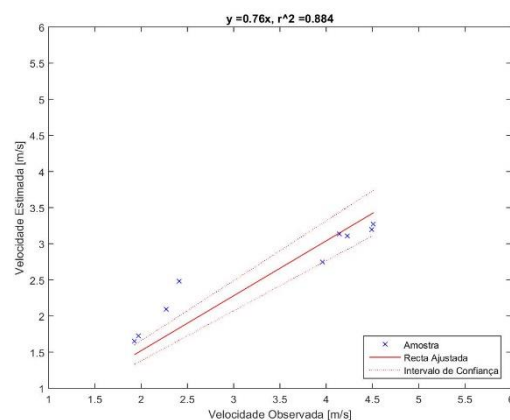
Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m^2/s^2]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	3.089	-0.871	0.758	21.98%
	rsw03	4.230	3.536	-0.694	0.482	16.41%
	rsw06	1.970	2.753	0.783	0.614	39.76%
	rsw07	1.930	2.526	0.596	0.355	30.88%
	rne07	2.410	3.144	0.734	0.539	30.47%
	tse06	2.270	2.743	0.473	0.224	20.84%

Anexo C.24. – Tabela de análise de erro individual para o compósito composto por tse08, tse11, rsw06, rsw07 e rne06 obtido com a distância Chebyshev.

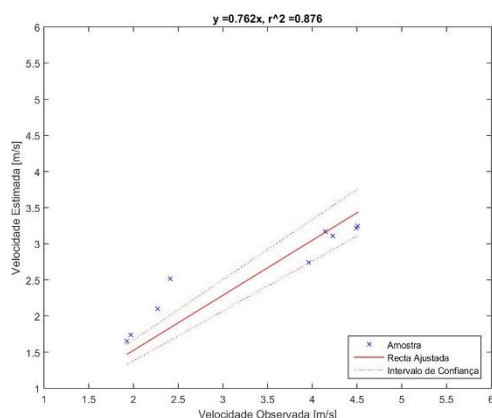
Compósito	Localização	Velocidade observada [m/s]	Velocidade estimada [m/s]	Viés [m/s]	Erro Quadrático [m^2/s^2]	Erro Normalizado
tse08 tse11	rne02	3.960	3.096	-0.864	0.746	21.81%
	rsw03	4.230	3.532	-0.698	0.488	16.51%
	rsw06	1.970	2.759	0.789	0.622	40.03%
	rsw07	1.930	2.535	0.605	0.366	31.33%
	rne07	2.410	3.147	0.737	0.544	30.60%
	tse06	2.270	2.736	0.466	0.217	20.53%



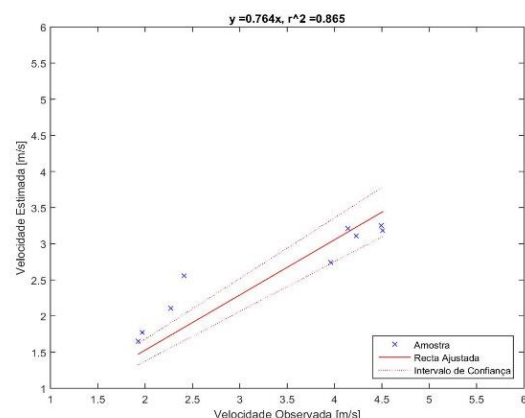
a)



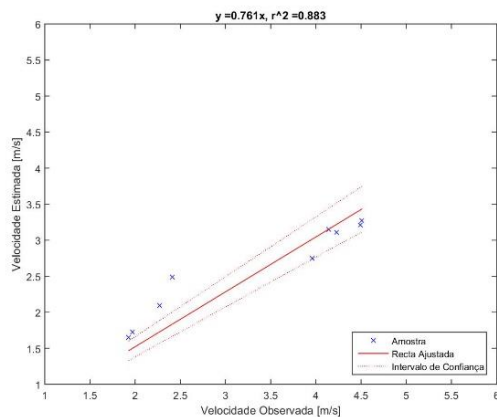
b)



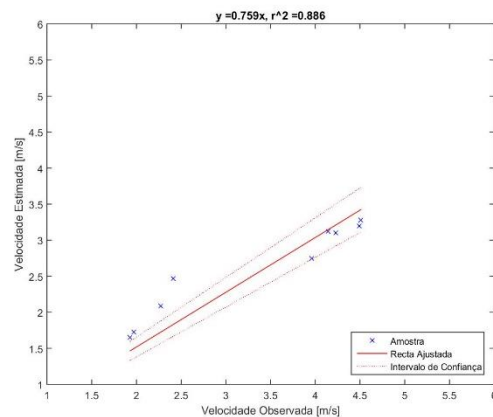
c)



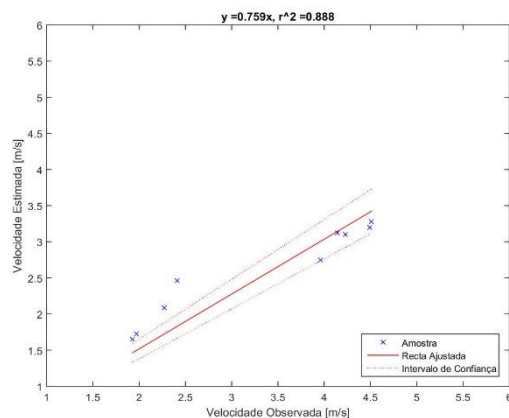
d)



e)

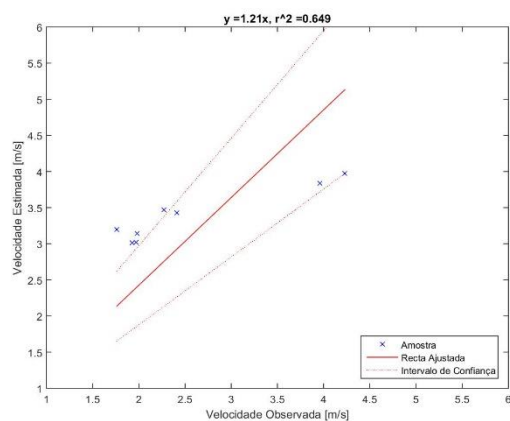


f)

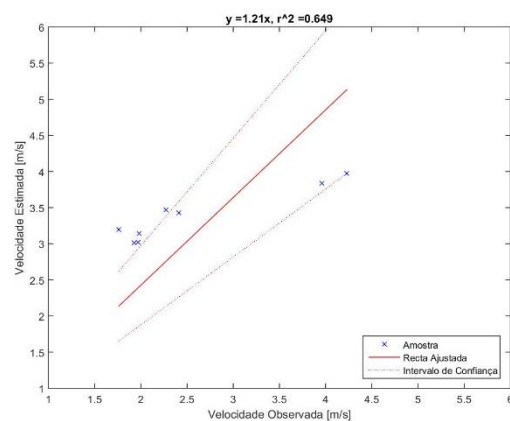


g)

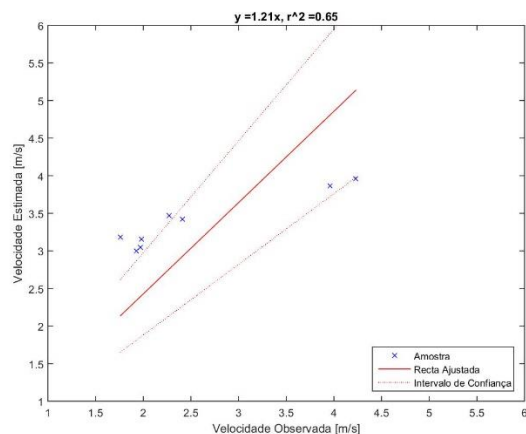
Anexo C.25. – Regressão linear obtida do compósito gerado pelas estações tse08 e tse11 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.



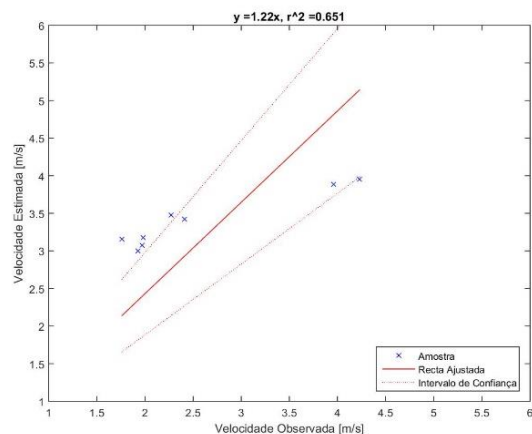
a)



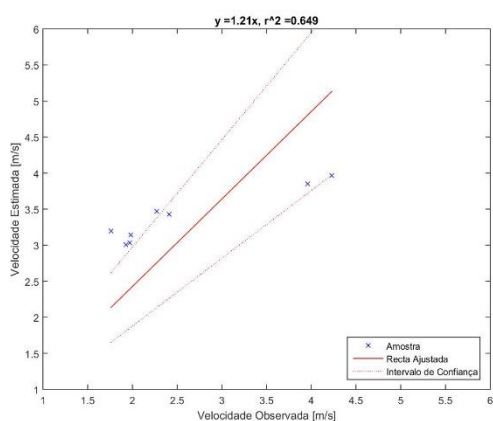
b)



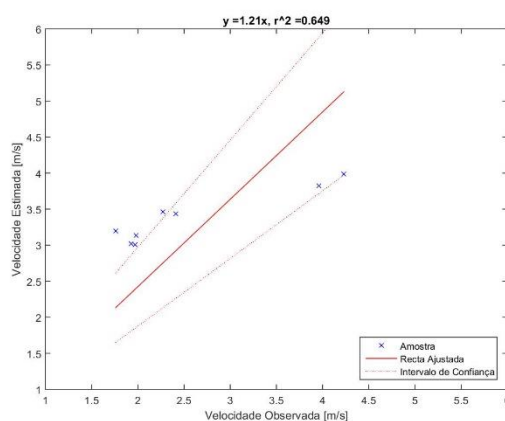
c)



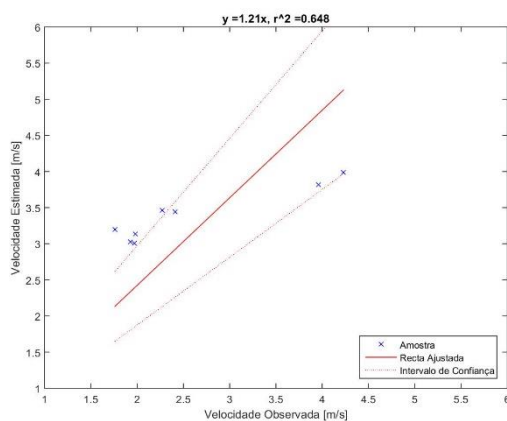
d)



e)

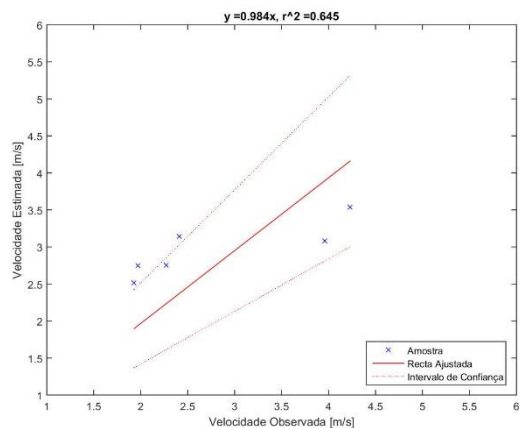


f)

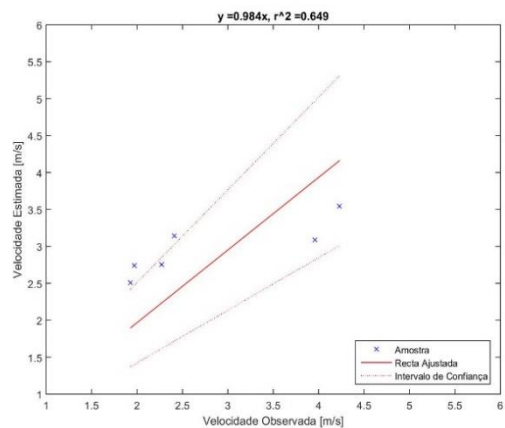


g)

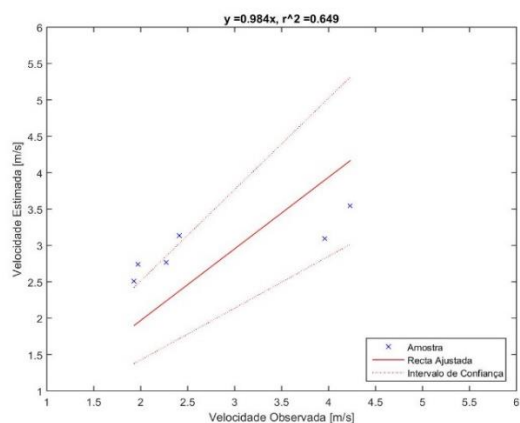
Anexo C.26. – Regressão linear obtida do compósito gerado pelas estações rsw06, rsw07 e rne07 por distância: a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.



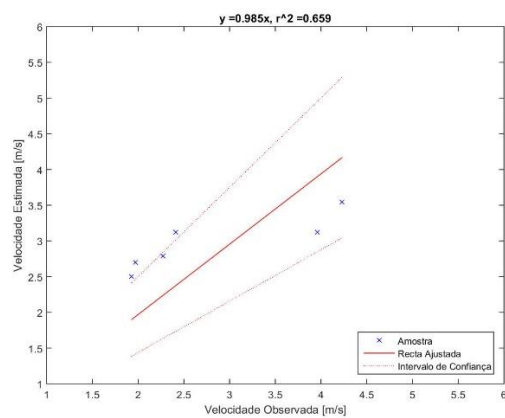
a)



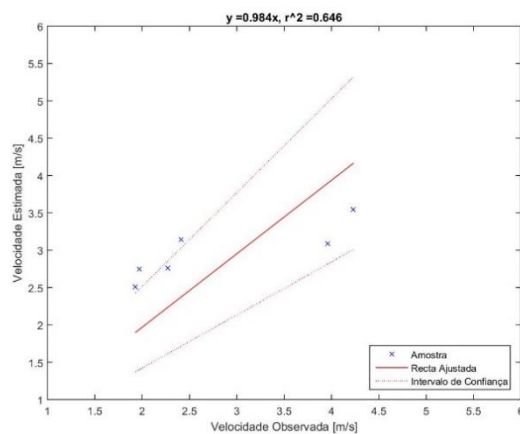
b)



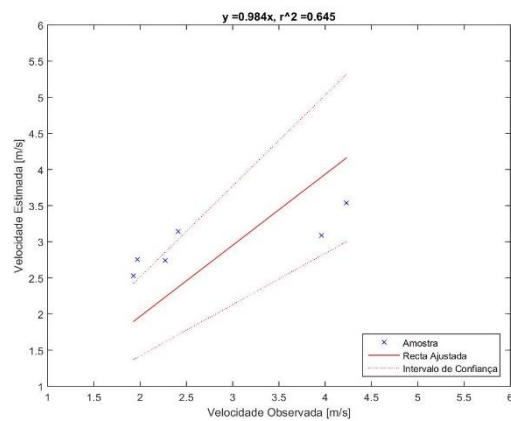
c)



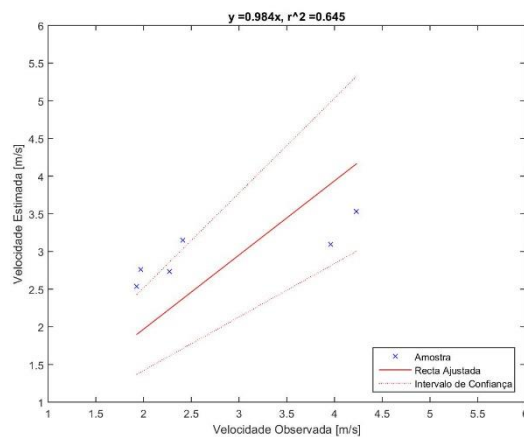
d)



e)



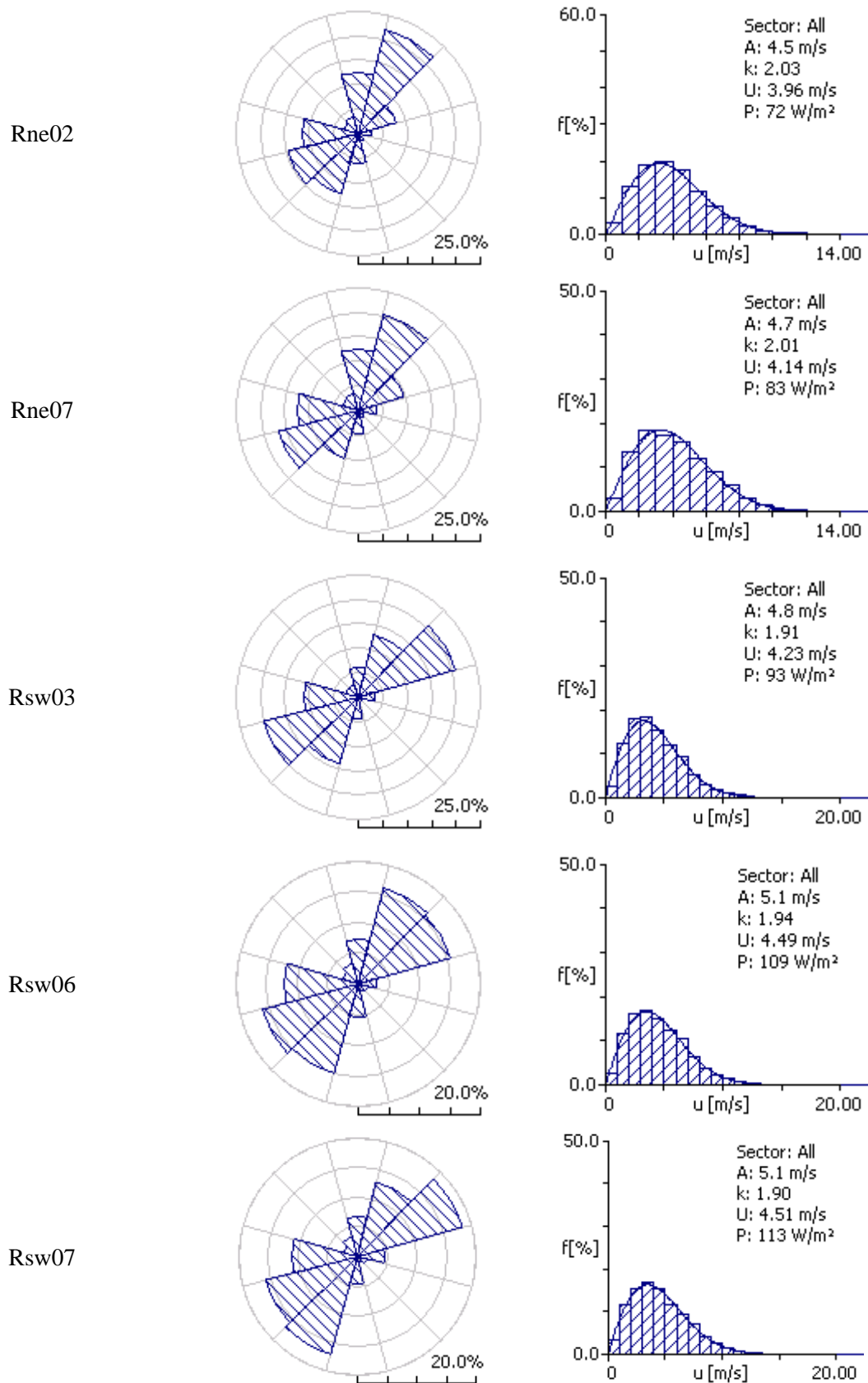
f)



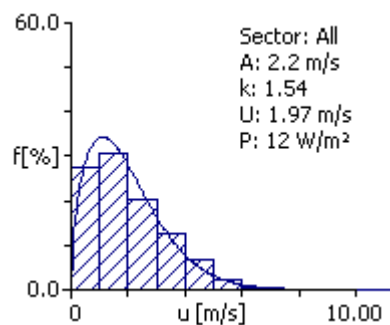
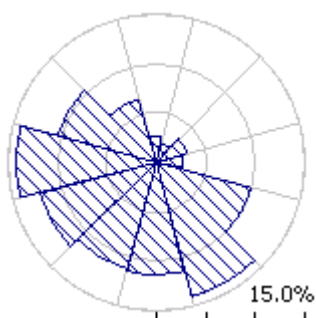
g)

Anexo C.27. Regressão linear obtida do compósito gerado pelas estações tse08, tse11 rsw06, rsw07 e rne07 por distância:
a) Euclidiana; b) Euclidiana a três dimensões; c) Manhattan; d) Minkowsky com $p=0,5$; e) Minkowsky com $p=1,5$; f) Minkowsky com $p=4$; g) Chebychev.

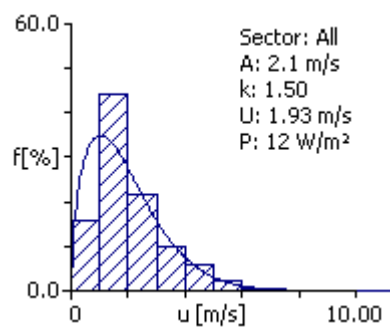
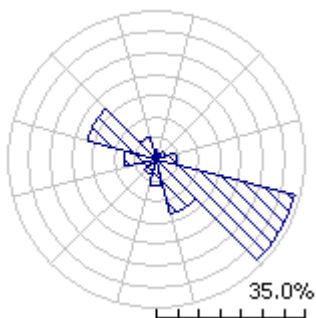
D. Diagrama de Rosa dos Ventos e Função Densidade



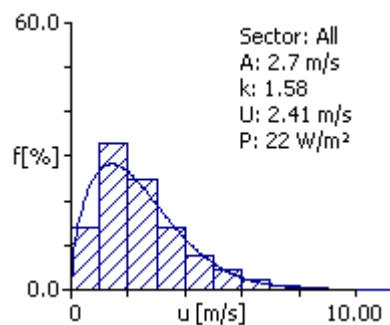
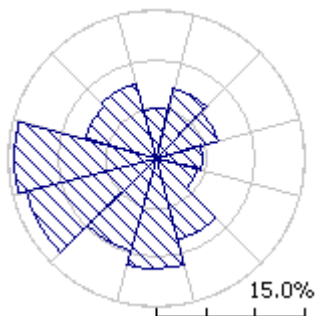
Tnw01



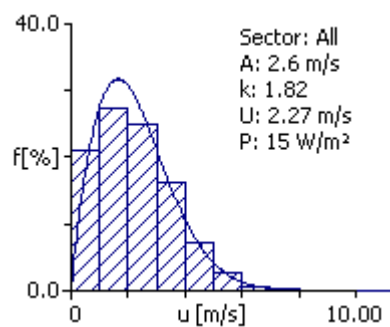
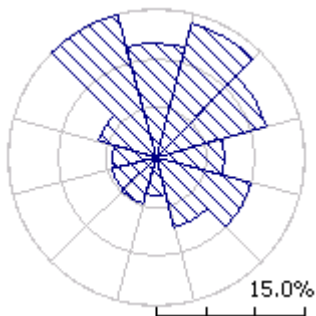
Tnw07



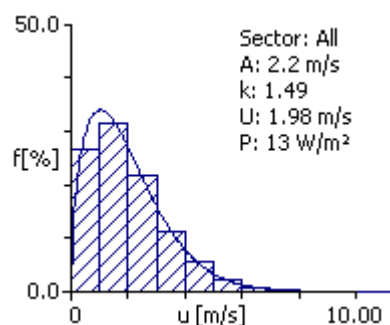
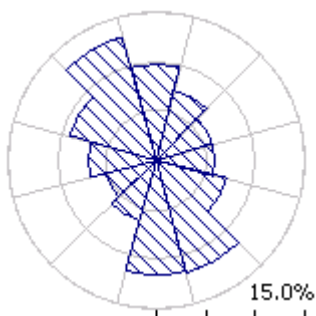
Tnm10



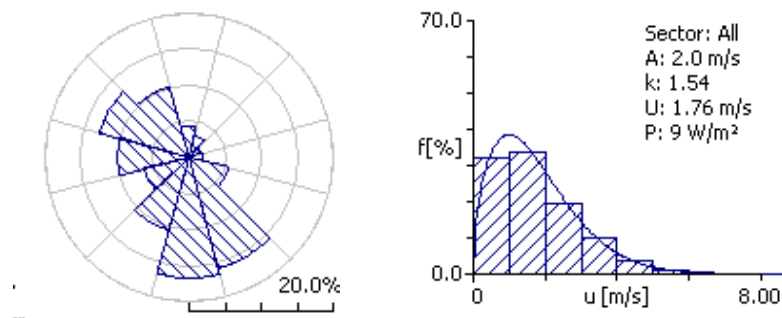
Tse06



Tse08



Tse11



Anexo D.1. – Diagrama de Rosa dos ventos e função densidade extraídos do WAsP para todas estações estudadas.